

Fachhochschule Köln
Cologne Institute for Renewable Energies

Masterarbeit

von

Kai Peter Eßer

Matrikel-Nr. 11068347

**Entwicklung einer Zielpunktstrategie und Flussdichteprognose für
den modularen Hochleistungsstrahler des DLR in Jülich**

**Development of an aiming point strategy and flux density
forecast for the modular high-flux solar simulator of the
DLR in Jülich**

Referent: Prof. Dr. V- Nickich

Korreferent: Dr. C. Raeder

Registrier-Nr.: MA EGM 5/15

Name, Vorname: Eßer, Kai-Peter

Köln, den 08.07.2015

Matr.-Nr.: 110 68 347

Thema (Kurzform) der Abschlussarbeit:

Das Thema der Arbeit ist das Entwickeln einer Zielpunktstrategie und einer Flusssichtprognose für den modularen Hochleistungsstrahler in Jülich. Die Simulation dieses ,noch in der Planung befindlichen, Sonnensimulators wird mit einer Raytracing Software durchgeführt. Die dafür erforderlichen Kenndaten werden ebenfalls in der Arbeit ermittelt.

Registrier-Nr: MA EGM 5/15

Erklärung zur Selbstständigkeit

Ich erkläre hiermit, dass ich meine Abschlussarbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Sperrvermerk

Ich erkläre hiermit, dass meine Abschlussarbeit

aufgrund einer Auflage der beteiligten Firma bis auf Widerruf **nicht** ausgeliehen werden darf

Bestätigung

Herrn Kai Peter Eßer

Matr.-Nr.: 110 68 347

wird hiermit bestätigt, dass er seine Abschlussarbeit heute bei mir Abgegeben hat.

Datum

Unterschrift

Inhalt

1. Einleitung.....	1
1.1. Sonnensimulatoren.....	1
1.2. Der modulare Hochleistungsstrahler (mHLS).....	2
1.3. Zielsetzung der Arbeit.....	2
2. Aufbau des Strahlers.....	3
2.1. Xenonblock.....	5
2.1.1. Xenon-Kurzbogenlampen.....	6
3. Voruntersuchungen.....	7
3.1. Reflexionsmessung.....	7
3.2. Messung der Strahlaufweitung.....	9
4. OptiCAD.....	12
4.1. Bedienung von OptiCAD.....	13
4.2. Aufbau des Simulationsmacros.....	13
4.3. Darstellung der Ergebnisse.....	18
4.3.1. Glätten der Ergebnisse.....	20
4.4. Zielgrößen der Simulation.....	20
5. Validierung der Randbedingungen.....	21
6. Zielpunktstrategie.....	24
6.1. Zielpunktstrategie für den mHLS.....	24
7. Flussdichteprognose für den mHLS.....	30
7.1. Bestimmung der maximalen Flussdichte.....	30
7.2. Grenzen der maximalen Flussdichte.....	31
7.3. Bestimmung der Betriebskennlinien.....	33
7.3.1. Bestimmung der Kennlinie für runde Targets.....	33
Bestimmung der Kennlinie für quadratische Targets.....	38
7.3.2. Simulation des Pilotprojektes.....	42
7.4. Interpretation der Simulationsergebnisse.....	46
8. Einfluss der optischen Eigenschaften auf die Flussdichte.....	50
9. Fehlerdiskussion.....	52
10. Fazit und Ausblick.....	53

11. Literatur	56
12. Verzeichnisse	57
Anhang	59

Vorwort

Die vorliegende Studienabschlussarbeit wurde am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) erstellt.

Das Thema ist die Entwicklung einer Zielpunktstrategie und Flussdichteprognose für den modularen Hochleistungsstrahler des DLR in Jülich, welcher zurzeit in der Planungsphase ist. Dieser Hochleistungsstrahler wird eine Brücke zwischen Sonnensimulatoren im Labormaßstab und Solartürmen darstellen. Als Forschungsanlage wird er in Zukunft die Entwicklung von Bauteilen für Solarturmkraftwerke unterstützen.

Meiner Meinung nach werden in Zukunft die fossilen, erschöpflichen Energieträger durch nachhaltige Primärenergiequellen ersetzt. Der mHLS, der in dieser Arbeit thematisiert wird, wird ein Werkzeug sein um den Weg in diese Zukunft schneller zu gehen.

Das es notwendig ist, diesen Weg zu gehen, wurde bereits 1931 von Thomas Edison erkannt.

*„Ich würde mein Geld auf die Sonne und die Solartechnik setzen. Was für eine Energiequelle! Ich hoffe, wir müssen nicht erst die Erschöpfung von Erdöl und Kohle abwarten, bevor wir das angehen.“
(Thomas Edison)*

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich einigen Leuten für die Unterstützung während meines Studiums danken. Zuallererst meinen Eltern für die finanzielle und mentale Unterstützung während des Studiums. Ohne diese Hilfen wäre mein Studium nicht in dieser Form möglich gewesen.

Frau Prof. Dr. Nicole Dünker für das Korrekturlesen meiner Arbeit in Rekordzeit.

Herr Prof. Dr. V. Nickich für die Betreuung dieser Arbeit.

Dr. Christian Raeder für die Vergabe und Betreuung dieser Arbeit am DLR, sowie Gerd Dibowski als Gruppenleiter der Arbeitsgruppe Großanlagen. Des weiteren Danke ich allen Mitarbeitern der Arbeitsgruppe Großanlagen, sowie den Mitarbeitern des Instituts für Solarforschung für das angenehme Arbeitsklima und die Unterstützungen, wo immer ich sie brauchte.

1. Einleitung

Die Sonne als Energiequelle wird in der Zukunft der Energieversorgung eine immer größer werdende Rolle spielen (Trieb et al., 2005). Daher ist es wichtig, sich heute schon darauf vorzubereiten und entsprechende Kraftwerke zu entwickeln. Der momentan vorherrschende Kraftwerkstyp für die großtechnische Stromversorgung ist das Parabolrinnenkraftwerk, welches ein Wärmeträgerfluid auf knapp 400°C erhitzt. (Winter et al., 1991)

Da in Zukunft höhere Wirkungsgrade wichtiger werden, um wirtschaftlicher zu arbeiten, müssen neue Technologien erforscht werden. Der Trend geht hierbei zu immer höheren Temperaturen, da durch eine höhere obere Prozesstemperatur der Carnot-Wirkungsgrad steigt. Aktuelle Turmkraftwerke mit erreichen Absorberrtemperaturen von bis zu 1000°C (Romero et al., 2002).

Um den maximal erreichbaren Wirkungsgrad zu steigern, muss die obere Prozesstemperatur weiter angehoben werden (Schneider, Pehnt, 2010) Um die Komponenten der Turmkraftwerke, im Besonderen die Absorber, im Labormaßstab bereits vor dem Bau des Kraftwerkes witterungsunabhängig zu testen und zu optimieren benötigt man Sonnensimulatoren, die in der Lage sind, die hohen Flussdichten, die auf den Kraftwerksabsorber einstrahlen, künstlich zu erzeugen.

Um im Voraus eine Abschätzung treffen zu können, welche Flussdichten und Leistungen, in Abhängigkeit der Positionierung der Lampen zu erwarten sind, wird eine Raytracingsoftware verwendet, um den modularen Hochleistungsstrahler zu simulieren.

1.1. Sonnensimulatoren

Im Bereich Forschung und Entwicklung weisen Sonnensimulatoren im Vergleich zur Sonne selbst für Versuche erhebliche Vorteile auf. Durch ihre Witterungsunabhängigkeit ist das Spektrum immer identisch, wogegen das Spektrum der Sonne von Jahreszeit, Tageszeit und Bewölkung bzw. Wasserdampfgehalt der Luft abhängt.

Des Weiteren kann die Flussdichteverteilung durch Verstellen der einzelnen Lampenblöcke eingestellt und die Bestrahlungsdauer frei gewählt werden. So sind Dauerversuche mit Bestrahlungsdauern von mehreren Tagen möglich.

Sonnensimulatoren für die Simulation von hohen Flussdichten weisen Lampenblöcke auf. Diese Lampenblöcke bestehen aus einer Lampe deren Licht mittels eines Reflektors auf einen Punkt konzentriert wird. (Dibowski et al., 2007)

Im Falle des Hochleistungsstrahlers (HLS) des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) am Standort Köln-Porz und des Paul-Scherrer-Instituts (PSI) in Villigen/Schweiz handelt es sich um Xenon-Kurzbogenlampen, die ein sehr sonnenähnliches Spektrum aufweisen und lediglich im nahen Infrarotbereich höher liegen. Beide Hochleistungsstrahler bestehen aus 10 Lampen, wobei die Leistung der Lampen des HLS in Köln $6\text{ kW}_{\text{elektrisch}}$ (Gerd Dibowski et al., 2007) und die des PSI bei $15\text{ kW}_{\text{elektrisch}}$ beträgt. (Petrasch et al., 2006)

1.2. Der modulare Hochleistungsstrahler (mHLS)

Der modulare Hochleistungsstrahler (mHLS) in Jülich soll eine Brücke zwischen Sonnensimulatoren im Labormaßstab und der großtechnischen Anwendung schlagen. Aktuelle Sonnensimulatoren haben Leistungen im Bereich von 20 kW (HLS, DLR Köln) und 50 kW (PSI, Villigen, Schweiz) (Eßer, 2013). Solartürme dagegen haben Leistungen weit über 100 kW bis zu mehreren MW. Der mHLS des DLR in Jülich soll eine optische Leistung von 200 kW auf das Target bringen; die Flussdichte soll dabei mehrere MW/m² betragen.

Da sich viele Anwendungen gerade in der Chemie nicht direkt vom Labormaßstab in die großtechnische Anwendung übertragen lassen, soll der mHLS als Bindeglied fungieren. Außerdem vereint er die Vorteile der witterungsunabhängigen Betriebsweise mit den hohen Leistungen und Flussdichten, die in Solartürmen zu finden sind.

Gefördert wird das Projekt mit Mitteln des Landes NRW und Mitteln des Bundes

1.3. Zielsetzung der Arbeit

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war die Simulation eines sich noch in der Planung befindlichen modularen Hochleistungsstrahlers, der am Standort Jülich gebaut werden soll.

Der modulare Hochleistungsstrahler (mHLS) der im Zuge dieser Arbeit simuliert wurde, wird über 121 Lampen verfügen, die in einem zweiten Ausbauschnitt auf 149 erhöht werden können. Die Leistung der Lampen wird 6kW_{elektrisch} betragen.

Im Zuge der Arbeit sollen Kenngrößen herausgefunden werden, die den Strahler darstellen. Es soll bestimmt werden, welche maximale Flussdichte erreichbar ist sowie eine Palette an möglichen Flussdichten auf verschiedenen Flächen erstellt werden, die einem Experimentator vorgelegt werden können. Wichtige Kenngrößen für diese Paletten sind die mittlere Flussdichte sowie die Bandbreite zwischen minimaler und maximaler Flussdichte, um zu bestimmen wie gleichmäßig die Verteilung ist.

2. Aufbau des Strahlers

Der modulare Hochleistungsstrahler wird aus 121 Xenonblöcken bestehen. Es ist geplant in einem zweiten Ausbauschnitt die Anzahl der Xenonblöcke auf 149 zu erhöhen. Die Xenonblöcke sind Einheiten bestehend aus Xenon-Kurzbogenlampe, Aluminiumreflektor, Zündgerät, Lüfter und Drehtischen zum Verstellen des Xenonblocks um 2 Achsen. Zusätzlich können die Xenonblöcke in der Horizontalen verschoben werden. Angeordnet werden die Xenonblöcke auf einem Kugelausschnitt mit einem Radius von 8 Metern. Die Gesamtbreite des Aufbaus beträgt 13,20 Meter und die Höhe 12,70 Meter.

In Abbildung 1 erkennt man die Anordnung der Lampen sowie deren Freiheitsgrade. Die axialen Verstellachsen auf der Rückseite der Reflektoren machen es möglich bis zu 3 Experimente gleichzeitig zu bestrahlen. Die Verstellung ist nötig, um die Entfernung zwischen Xenonblock und Experiment auf die Brennweite von 8 Metern einstellen zu können.

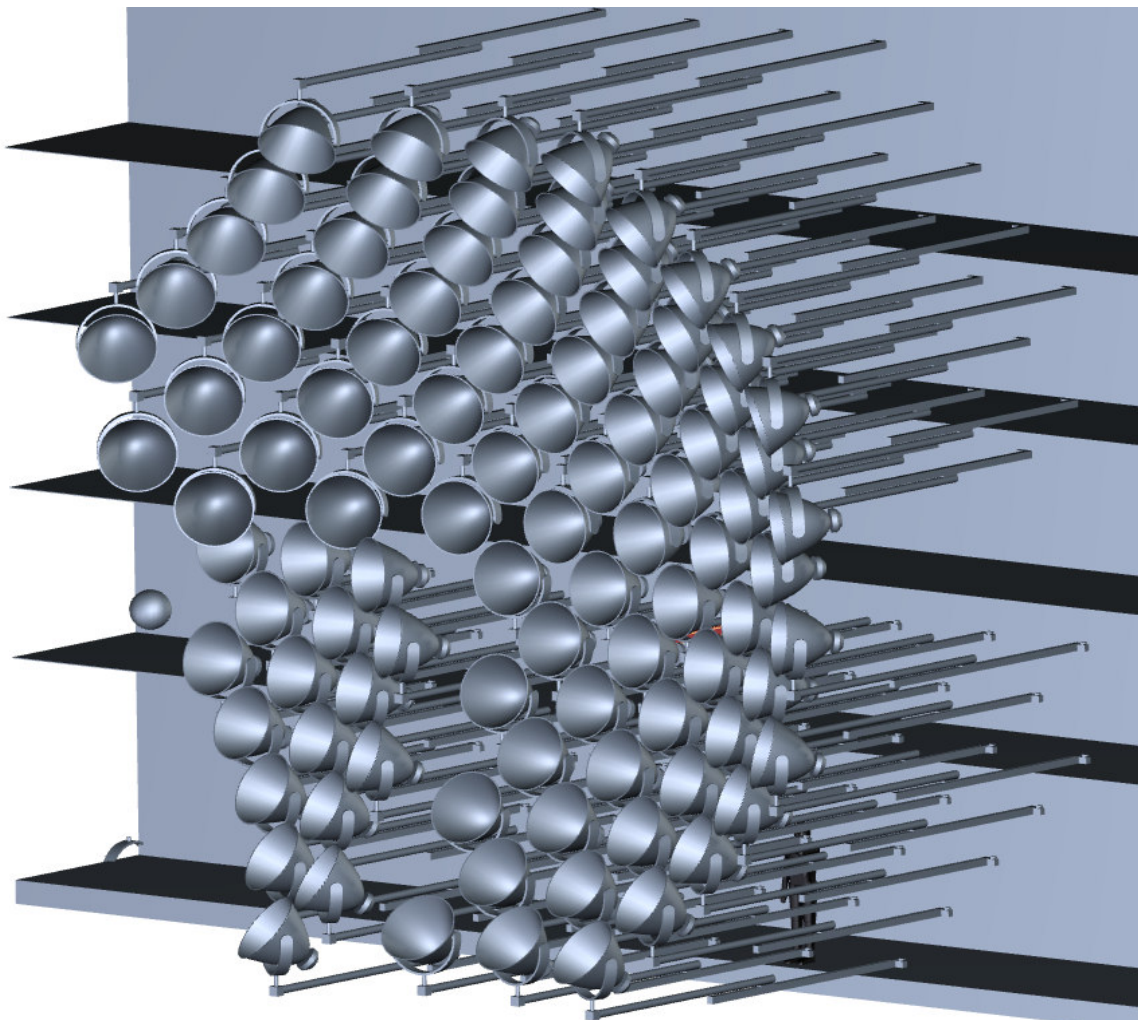


Abbildung 1 – Erstes CAD-Modell des mHLS in Jülich (Quelle: Architekturbüro Schüssler, Jülich)

Um die einzelnen Lampen zuordnen zu können werden sie in Zeilen unterteilt und mit A – M benannt (siehe Abbildung 2). In jeder Zeile werden die Lampen durchnummeriert.

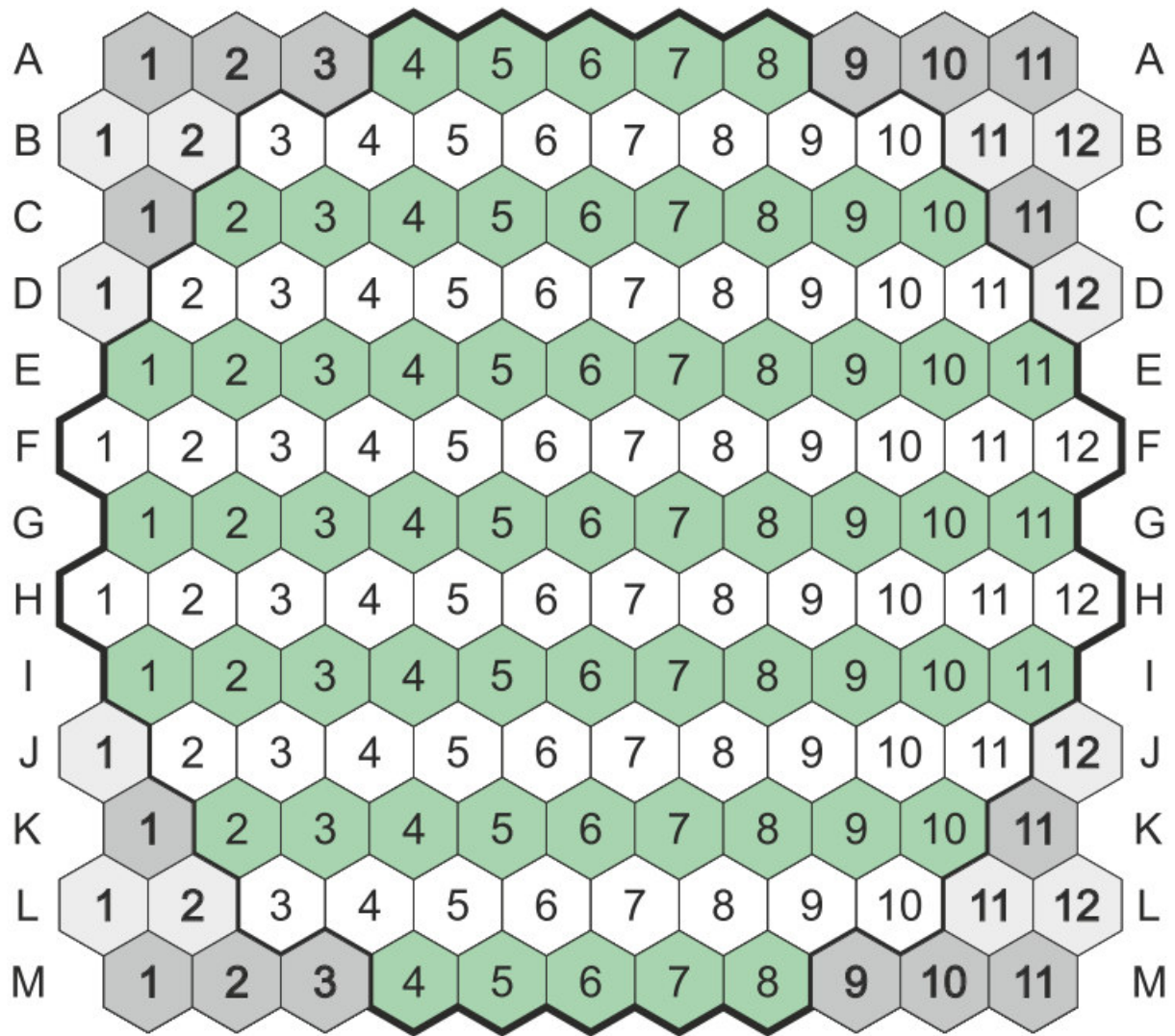


Abbildung 2 - Benennung der Xenonblöcke

Die grün-weißen, umrahmten Waben sind die 121 Lampen der ersten Ausbaustufe, grau-weiß sind die weiteren 28 der zweiten Ausbaustufe mit insgesamt 149 Lampen (Abbildung 2). Die Benennung der Lampen ist korrekt für die Sicht des Strahlers vom Experiment aus. Die Wabengröße der Xenonblöcke beträgt 1100mm in der X-Achse und 1270mm in der Y-Achse. Der Wert der Z-Achse wurde mit der Formel $R^2 = x^2 + y^2 + z^2$ mit dem Radius $R = 8\text{m}$ berechnet.

Aufgebaut wird das Strahler-Array dann dadurch, dass die Koordinatensystem 8m in positiver z-Richtung verschoben werden. Anschließend werden die Lampen einzeln um den globalen Nullpunkt gedreht. Die erforderlichen Winkel lassen sich aus den zuvor berechneten Zielkoordinaten jedes Xenonblocks berechnen.

Die Winkel ϕ und θ werden mit nachfolgenden Formeln berechnet.

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$$

$$\theta = \arccos \frac{z}{r}$$

$$\theta = \text{atan2}(x, y) = \begin{cases} \arctan\left(\frac{y}{x}\right) & , \text{wenn } x > 0 \\ \text{sgn}(y) \frac{\pi}{2} & , \text{wenn } x = 0 \\ \arctan\left(\frac{y}{x}\right) + \pi & , \text{wenn } x < 0 \text{ und } y \geq 0 \\ \arctan\left(\frac{y}{x}\right) - \pi & , \text{wenn } x < 0 \text{ und } y < 0 \end{cases}$$

(Papula, 2001)

Daraus ergibt sich beispielhaft für die Zeile „C“

Xenonblock	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
Θ in °	28.44	28.44	28.44	28.44	28.44	28.44	28.44	28.44	28.44
φ in °	38.72	27.98	18.22	8.996	0	-8.996	-18.22	-27.98	-38.72

Hierbei steht θ für die Drehung um die X-Achse und entspricht der Elevation. φ steht für die Drehung um die Y-Achse und entspricht dem Azimuth des Xenonblocks.

2.1. Xenonblock

Im Brennpunkt des ellipsoiden Reflektors befindet sich der Plasmakern der Xenon-Lampe. Die Länge des Reflektors beträgt 700mm und die Breite der Öffnung 1005mm. Die Ellipse hat eine Brennweite von 8 Metern. Von innen wird der Reflektor mit einer speziellen hochspiegelnden und hitzebeständigen Beschichtung überzogen. Durch ein Loch hinten im Reflektor wird die Lampe in dem Reflektor positioniert, zusätzlich wird durch dieses Loch der Kühlluftstrom für die Lampe geführt.

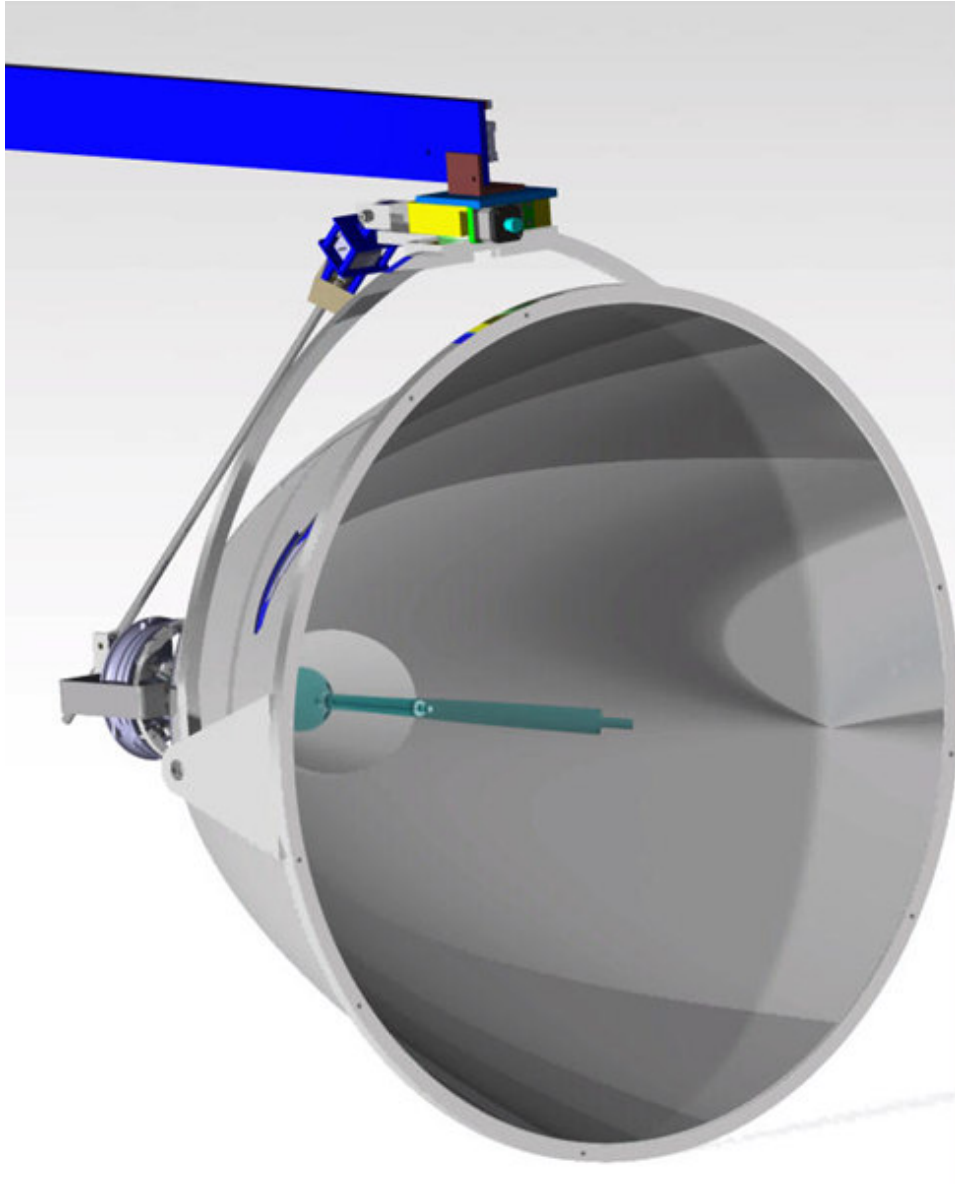


Abbildung 3 – CAD-Modell des Xenonblocks im Detail (Quelle: Systemhaus Technik, DLR)

Die Position der Aufhängung des Xenonblocks ist so gewählt, dass die Bewegung der Front des Reflektors minimiert wird, gleichzeitig aber auch der Hebelarm zwischen Drehpunkt und Schwerpunkt des Reflektors klein gehalten wird. Dadurch ist es möglich, die Lampen eng aneinander zu positionieren ohne dass es zu Kollisionen kommt, zeitgleich aber auch einen Antrieb mit günstigen Motoren zu realisieren. In Abbildung 3 grün dargestellt befindet sich im Reflektor die Lampe, hinten am Reflektor - Abbildung 3 in blaugrau dargestellt - ist der Axiallüfter für die Lampenkühlung angebracht. Oberhalb des Reflektors ist der Drehtisch für die Verstellung der x-Position, dahinter befindet sich die Verstelleinheit für die y-Achse

2.1.1. Xenon-Kurzbogenlampen

Das Standard Solar Spektrum ASTM G173-03 entspricht näherungsweise dem Spektrum der verwendeten Kurzbogenlampen. Zu beachten ist, dass die Kurzbogenlampen im Vergleich mit dem Solarspektrum einen höheren Anteil an Infrarotlicht besitzen.

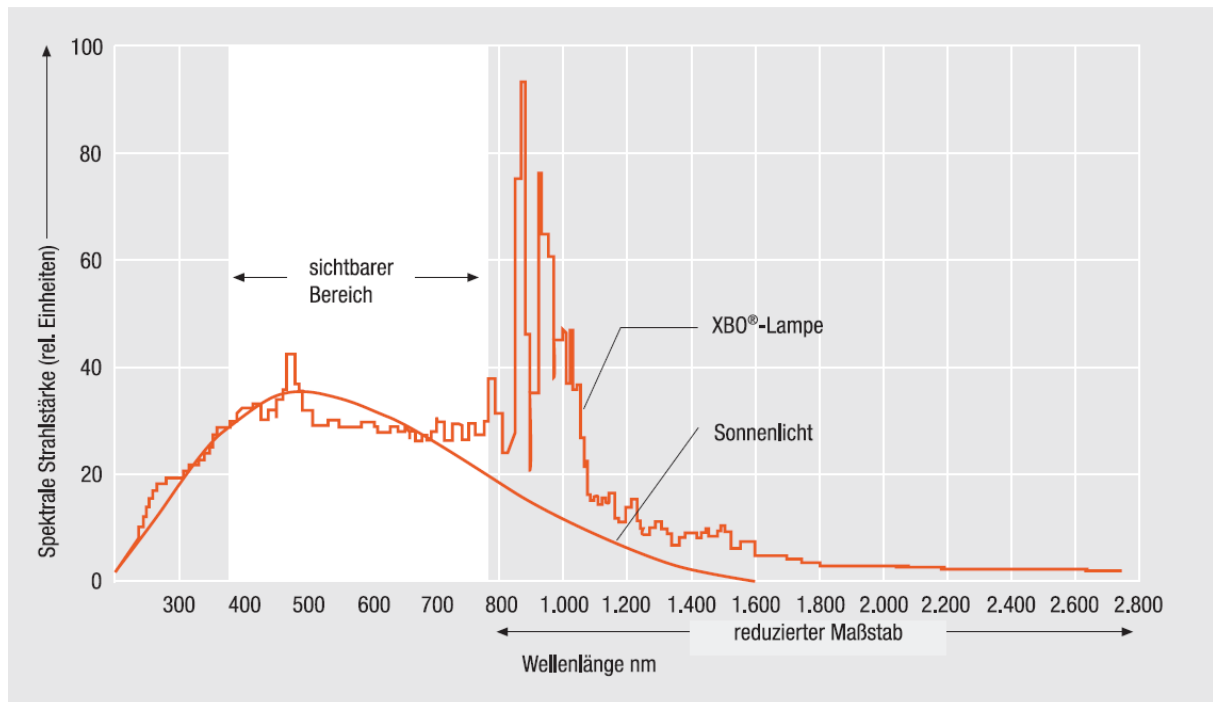


Abbildung 4 - Spektrum der Xenon-Kurzbogenlampen (Quelle: Herstellerangabe OSRAM)

In Abbildung 4 sieht man die Überhöhung der Strahlstärke im infraroten Bereich zwischen etwa 800 und 1100 nm. Durch die hohe Ähnlichkeit der Spektren im sichtbaren Bereich haben sie einen Farbwiedergabeindex von mehr als 95, weshalb die Lampen für Kinoprojektoren verwendet werden.

3. Voruntersuchungen

Um in der Raytracing-Software OptiCAD belastbare Ergebnisse zu bekommen, müssen vorher die Randbedingungen, die für die Simulation wichtig sind, festgelegt werden. Wichtige Kenngrößen sind die optische Leistung der Lampen, die Reflektivität der Spiegel und die Strahlaufweitung der an der Spiegeloberfläche reflektierten Strahlen.

3.1. Reflexionsmessung

Die Reflektivität der Spiegel ist eine wichtige Kenngröße für die Simulation in OptiCAD. Je höher die Reflektivität der Spiegel umso höher ist die Leistung, die auf dem Target auftrifft.

Die Reflektivität wird mit einem LAMBDA 1050 UV/Vis/NIR Spectrophotometer gemessen. Hierbei wird die Intensität eines Lichtstrahls gemessen, welcher über einen Referenzspiegel reflektiert wird. Anschließend wird der Referenzspiegel durch die Probe ersetzt und zur Referenz in Relation gesetzt. (Herstellerangabe PerkinElmer)

Diese Messung kann mittels Monochromator wellenlängenabhängig durchgeführt werden.

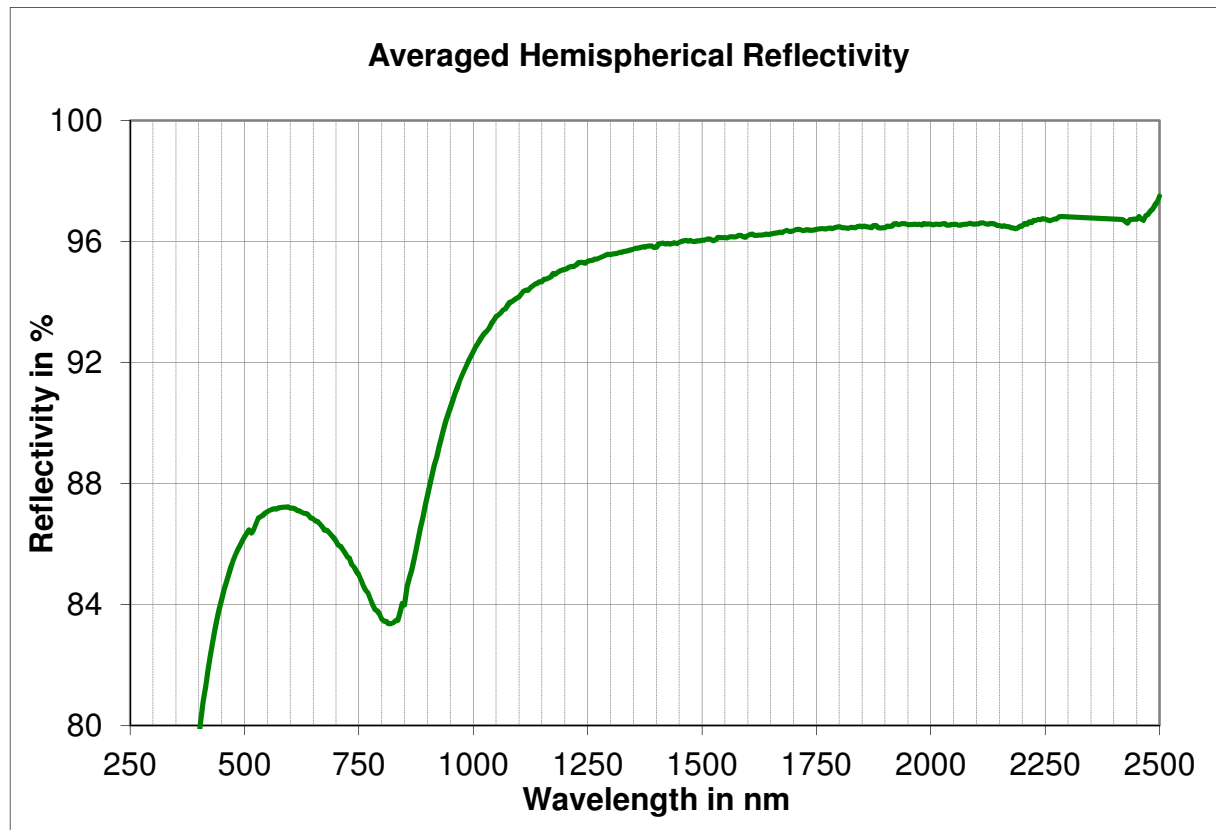


Diagramm 1 - Nach ASTM G173-03 Solar gewichtete Reflektivität (Quelle: Auswertebericht Spiegelvermessung, Florian Wiesinger)

Die gemittelte und nach ASTM G173-03 gewichtete Reflektivität der 6 Proben beträgt 90%. In Diagramm 1 ist die Reflektivität gegen die Wellenlänge aufgetragen. Der Verlauf des Graphen zeigt, dass das Licht im nahen Infrarotbereich bis zu 97% reflektiert wird, im blauen bis ultravioletten Bereich fällt dieser Wert auf bis zu 80% ab. Bei 600nm befindet sich ein lokales Maximum mit einer Reflektivität von 87,16%; ein lokales Minimum von 83,37% Reflektivität liegt bei 820nm. (Auswertebericht Spiegelvermessung, Florian Wiesinger)

Wichtig ist dieser Wert für die Messung mit dem Reflektivitätsanalysegerät Mirror Reflectance Analyzer (MIRA), die diese Reflektivität als Konvergenzgrenze benötigt wird.

3.2. Messung der Strahlaufweitung

Mit dem Messgerät Mirror Reflectance Analyzer MIRA, welches vom DLR entwickelt wurde, ist es möglich die Strahlaufweitung eines reflektierten Lichtstrahls zu bestimmen.

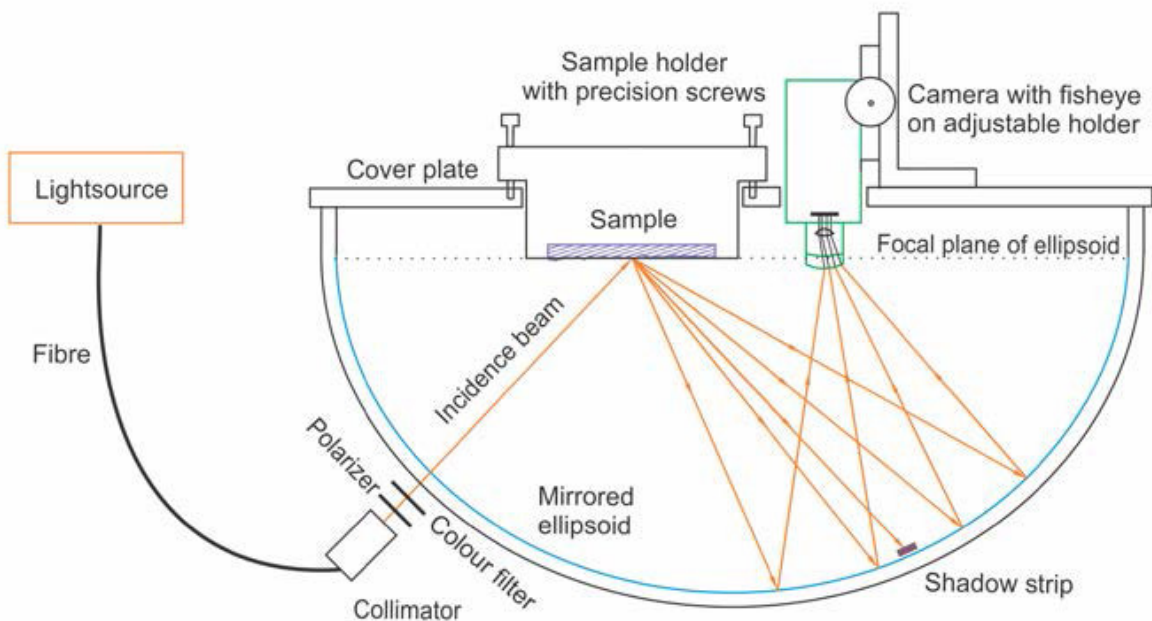


Abbildung 5 - Prinzipzeichnung von MIRA (Quelle: MIRA Manual für den internen Gebrauch)

MIRA besteht aus einem ellipsoiden Reflektor in dem ein Probenhalter und eine Kamera mit Fischaugenlinse in den Brennpunkten des Ellipsoids installiert sind (Abbildung 5). Es wird ein Strahl monochromatischen Lichts mit Wellenlängen zwischen 500nm und 700nm eingebracht, der von der Probe reflektiert wird und anschließend von der Kamera detektiert wird. Die Kamera ist ein CCD-Chip mit einer Pixelgröße von $5,5\mu\text{m}$ und einem Füllfaktor von 80%. Dadurch ist MIRA in der Lage eine Auflösung von $1,3\text{mrad/Pixel}$ zu erreichen, aufgrund des hohen Füllfaktors können auch schwache Signale aufgezeichnet werden. Der optional verwendbare Schattenstreifen hat die Aufgabe den spekularen Strahl abzudecken, damit die nahezu spiegelnde Streuung besser darzustellen ohne in der Mitte des Kamerabildes zu übersteuern. (Meyen, Sutter, Heller 2014)



Abbildung 6 - MIRA Bilder (Links normal - Rechts reingezoomt)

In Abbildung 6 sieht man ein Bild, welches vom CCD-Chip aufgenommen wurde. An der Pfeilspitze in der linken Abbildung befindet sich der rot umrandete Ausschnitt auf den in der rechten Abbildung hineingezoomt wurde.

Zur Auswertung der Bilder wird jedem Pixel ein Grauwert zugeordnet. Je heller das Grau ist, desto höher ist der Wert. MIRA gibt als Ergebnisse außerdem die Reflektivität über den Akzeptanzwinkel (ROA) aus. Dieser Wert gibt an, wieviel der insgesamt auf den Chip einfallenden Strahlung in einem akzeptierten Winkel auftrifft.

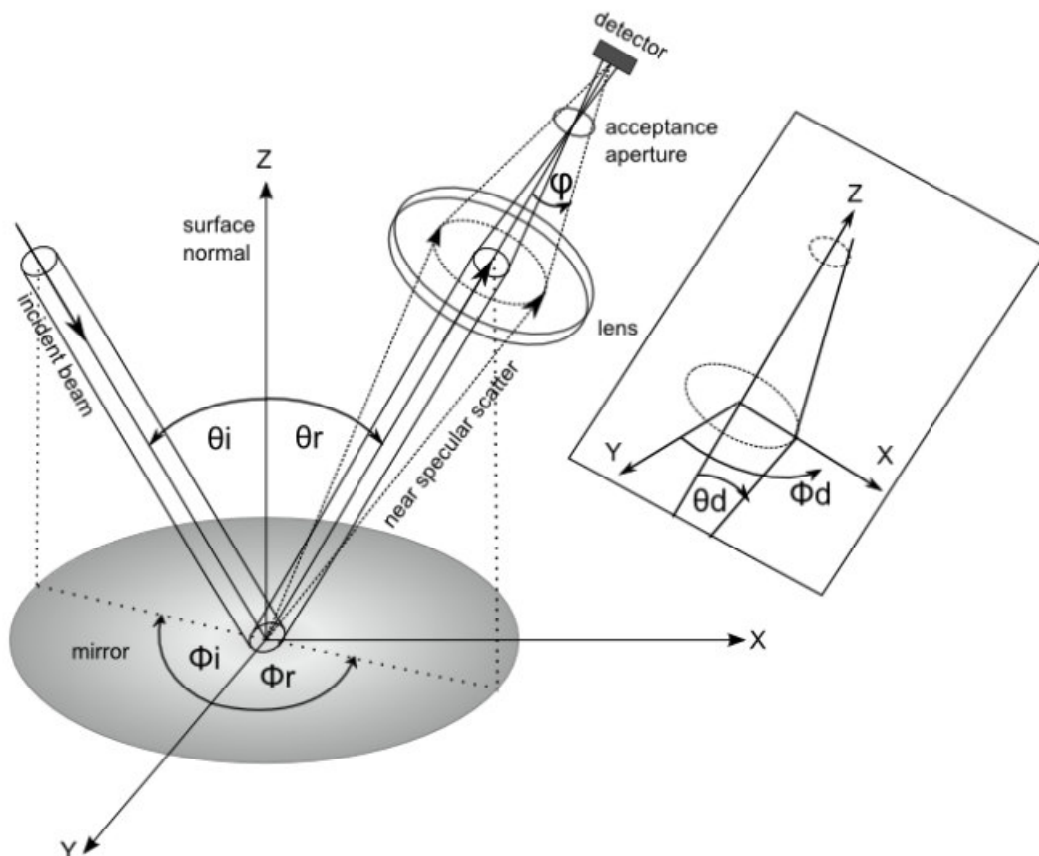


Abbildung 7 - Definition des Akzeptanzwinkels (Quelle: MIRA Manual für internen Gebrauch)

Der Akzeptanzwinkel ϕ (siehe Abbildung 7) ist der Winkel, der zwischen der Mittelachse des ungestreuten Strahls und dem äußersten Winkel akzeptiert wird. Mit größerem Akzeptanzwinkel fällt mehr Licht auf den Detektor, da die Akzeptanzapertur größer wird. Es ist vergleichbar mit einer Kamerablende die bei zu hellen Lichtverhältnissen kleiner wird, das heißt den Akzeptanzwinkel verkleinert, um zu verhindern, dass die Aufnahme überbelichtet wird.

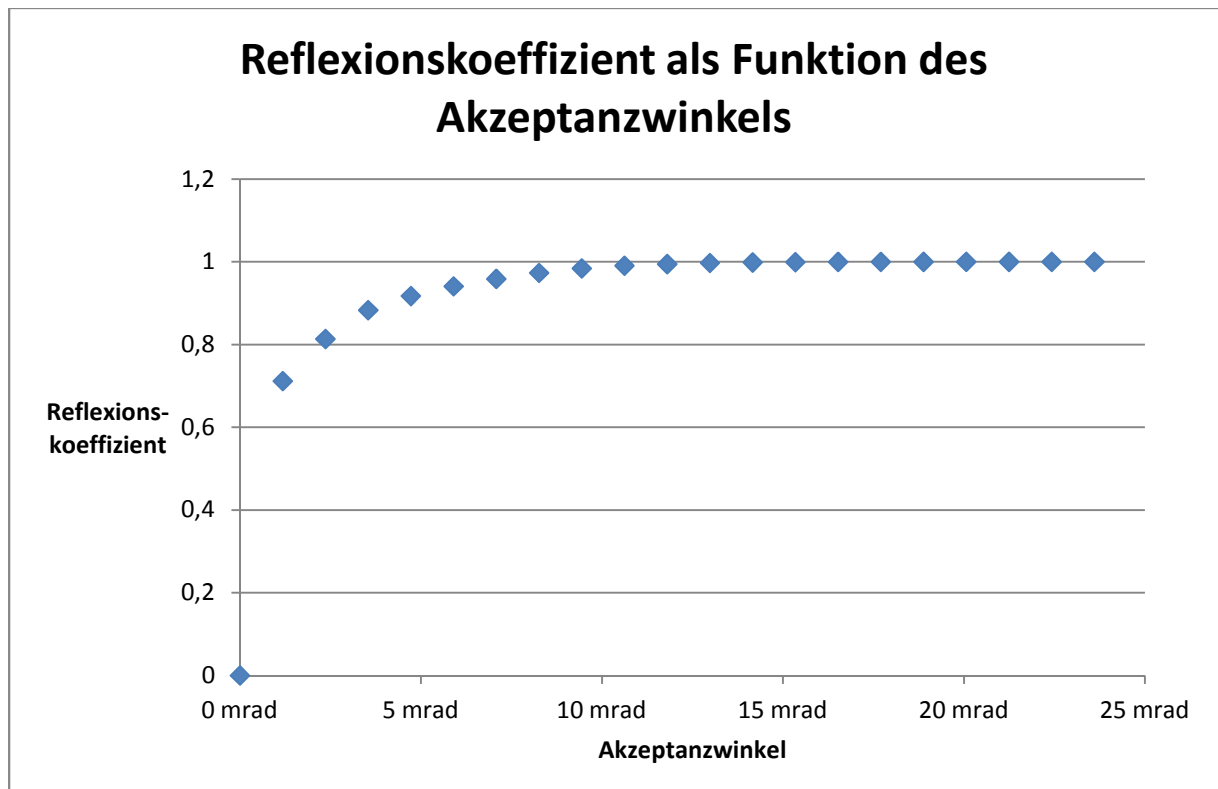


Abbildung 8 - Reflexionskoeffizient als Funktion des Akzeptanzwinkels

In Abbildung 8 wird gezeigt wieviel der reflektierten Strahlung als Funktion des Akzeptanzwinkels detektiert wird. Bei einem Winkel von 0 rad fällt kein Licht mehr auf den Detektor, da die Apertur infinitesimal klein wird. Ab einem Akzeptanzwinkel von 15 mrad wird das gesamte Licht des ungestreuten Strahls auf dem CCD-Chip detektiert.

Da in OptiCAD eine Gaußfunktion verwendet wird, um die Streuung der Spiegel darzustellen, muss die Reflexionsfunktion in eine Gaußkurve überführt werden. Das σ der Gaußkurve ist der Parameter, den OptiCAD zur Darstellung der Streuung benötigt.

Um die Funktion in Abbildung 8 in eine Gaußkurve zu überführen wird eine lineare Transformation durchgeführt.

$$H(\varphi) = 1 - R(\varphi) \quad \text{mit } H: \text{Helligkeit und } R: \text{Reflexionskoeffizient}$$

Der daraus entstehende Graph kann aufgrund der Rotationssymmetrie des Reflexionskoeffizienten an der Ordinate des Koordinatensystems gespiegelt werden. Anschließend wird die Funktion mittels Gaußfunktion gefittet. Dies geschieht mit einem Excel-Tool.

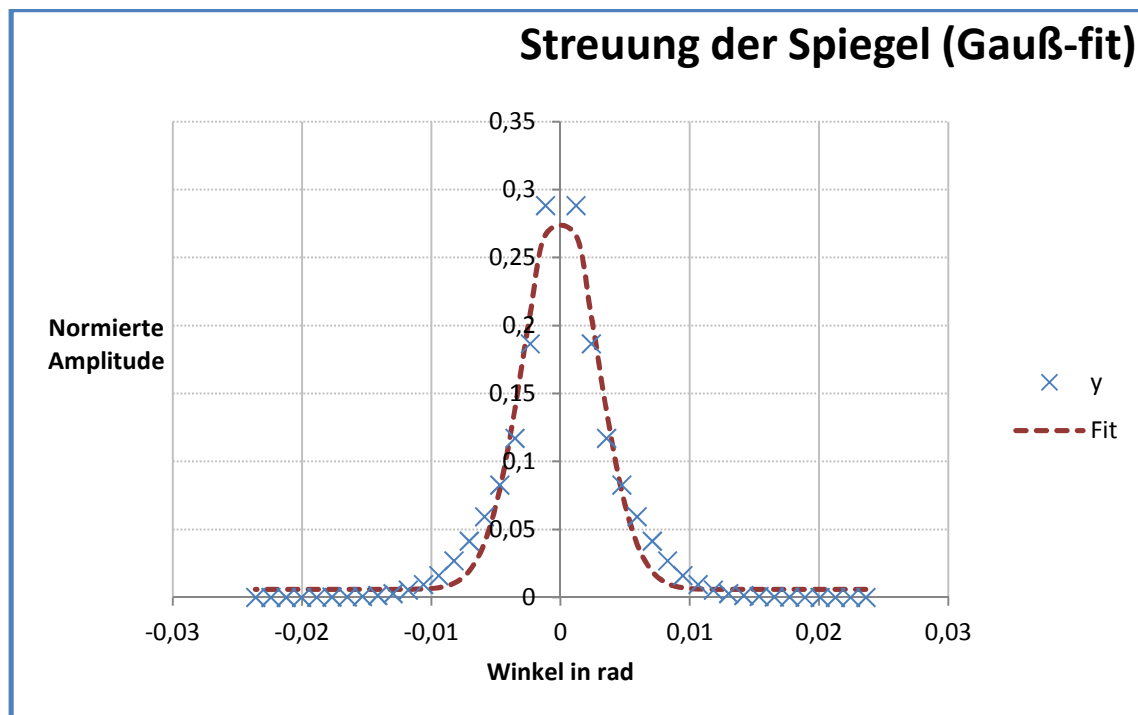


Diagramm 2 - Streuung der Spiegel, normiert

Die gefittete Gaußfunktion hat ein σ von 2,9 mrad.

Dieser Wert wird nun zusammen mit der Reflektivität zur Darstellung der optischen Eigenschaften der Spiegeloberfläche in OptiCAD übertragen.

4. OptiCAD

OptiCAD ist ein nicht-sequentielles Strahlverfolgungsprogramm (Raytracingsoftware) zur Simulation von Beleuchtung, Durchführung von optischen Analysen und zur Visualisierung. Das bedeutet, die Strahlen treffen auf die nächsten Objekte die ihnen im Weg liegen und folgen nicht vordefinierten Wegen. (Herstellerangabe)

Das Programm ist in der Lage Reflexion, Brechung und Streuung sowohl an Oberflächen als auch in Körpern darzustellen. Ebenso verfügt es über eine große Bandbreite an optischen Komponenten wie Prismen, Linsen und Spiegel, sowie eine Katalog mit optischen Gläsern. OptiCAD verfügt über CAD Softwareschnittstellen; so können Dateien vom Typ IGES oder STEP direkt in das Programm hineingeladen werden.(OptiCAD Manual)

4.1. Bedienung von OptiCAD

OptiCAD lässt sich sowohl von der Benutzeroberfläche her als auch per Skript steuern. Die Skriptsteuerung hat den Vorteil, dass große Befehlssätze schnell geladen werden können und auch die Reihenfolge bleibt dabei immer gleich, kleine Parameteränderungen oder Variantenberechnungen können so schnell durchgeführt werden. Zusätzlich bietet es einen Zeitvorteil im Gegensatz zur Steuerung über die Benutzeroberfläche und es mindert die Fehleranfälligkeit, da ein einmal korrekt geschriebenes Macro sich nicht mehr verändert und Bedienerfehler sind bei erneutem Laden des Macros ausgeschlossen.

Einsatzgrenzen von OptiCAD liegen sowohl in der Anzahl der Strahlen pro Lichtquelle als auch in der Gesamtzahl der Strahlen. Eine Simulation von mehr als 20 Millionen Strahlen führt zu Abstürzen. Des Weiteren sind in dieser Anwendung maximal 10.000 Strahlen pro Lichtquelle in einem Durchgang möglich.

Ein Problem bei der Verwendung von OptiCAD ist, dass Elemente zwar relativ zueinander ausgerichtet werden können, aber nicht verknüpft werden. In der Praxis bedeutet das, dass für jedes Verstellen eines Xenonblocks alle Elemente des Xenonblocks einzeln neu ausgerichtet werden müssen. Da dies sehr aufwendig ist und Fehlerpotentiale birgt, empfiehlt es sich die erforderlichen Änderungen im Macro vorzunehmen und das gesamte Programm neu zu laden. Bei einem Neuaufbau des gesamten Setups wird für die Verstellung des gesamten Xenonblocks nur eine Verstellung des lokalen Koordinatensystems benötigt, an dem sich der Strahler orientiert.

Es ist möglich, in einem Macro weitere Macros aufzurufen. Dies kann dazu verwendet werden, das Macro übersichtlicher zu gestalten, außerdem bietet es den Vorteil, dass durch Auskommentieren einer Zeile einzelne Unterprogramme herausgenommen werden können. Durch das Zeichen „#“ können einzelne Programmzeilen auskommentiert werden, wodurch sie unwirksam werden.

Bei jedem Simulationsdurchgang wird die zuvor festgelegte Leistung der Lampe aufgeteilt auf die maximal 10.000 Strahlen, das heißt, dass bei mehrfachen Durchgängen pro Lampe auch die Gesamtlampenleistung erhöht wird. Ist es geplant, mehr als 10.000 Strahlen pro Lampe zu simulieren, muss die Lampenleistung angepasst werden. Bei zwei Durchgängen muss die Lampenleistung halbiert werden.

4.2. Aufbau des Simulationsmacros

Das Hauptmacro startet mit einem Startupteil in dem grundlegende Parameter festgelegt werden. Dazu gehören die Längen- sowie Leistungseinheiten in denen gerechnet wird, die Anzeigeeinstellungen und die Spektren der Lichtquellen. Da es kaum noch Anfragen zu wellenlängenabhängigen Experimenten gibt, sondern alleine die Leistung zählt, wird das Spektrum der Lampe nicht berücksichtigt (Abbildung 9).

```
1 clear
2 echo/on
3 #set/saveray/on
4 #set/savespot/on
5 view/noopengl
6 view/noopengl/rays
7 set/fletch/off
8 set/add_rays/on
9 set/workbox 0 0 0 100 100 100
10 set/raylim 100 0.01 1
11 set/fresnel/off
12 set/autoretrace/off
13 set/autoredraw/on
14 #set/color/val 7 12
15 set/sphlensvertex/on
16 set/matcatalog/name=schott.agf
17 set/proximity 0
18 set/energy/absolute
19 set/energy/density
20 set/units/mm
21 set/wave .55 .55 .55 .55 .55 .55 .55 .55 .55 .55 .55 .55
22 set/weight 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
```

Abbildung 9 - Startupteil des Simulationsmacros

Der mHLS in Jülich besteht aus 121 Lampen. Um das Modell in OptiCAD zu übertragen, werden zunächst 121 Koordinatensysteme definiert, an denen die Xenonblöcke ausgerichtet werden.

Der Xenonblock für die Simulation besteht aus einem ellipsoiden Spiegel, einer punktförmigen Lichtquelle, die von einer Koma mit Lambert'schen Streueigenschaften umgeben wird um die Ausdehnung des Plasmakerns darzustellen sowie zwei runden absorbierenden Scheiben, die die Elektroden der Lampe darstellen.

Der Reflektor ist in Abbildung 10 links als Drahtgittermodell dargestellt. Rechts im Bild sind Koma, Lichtquelle, Lichtbogen und Elektroden der Lampen vergrößert zu sehen.

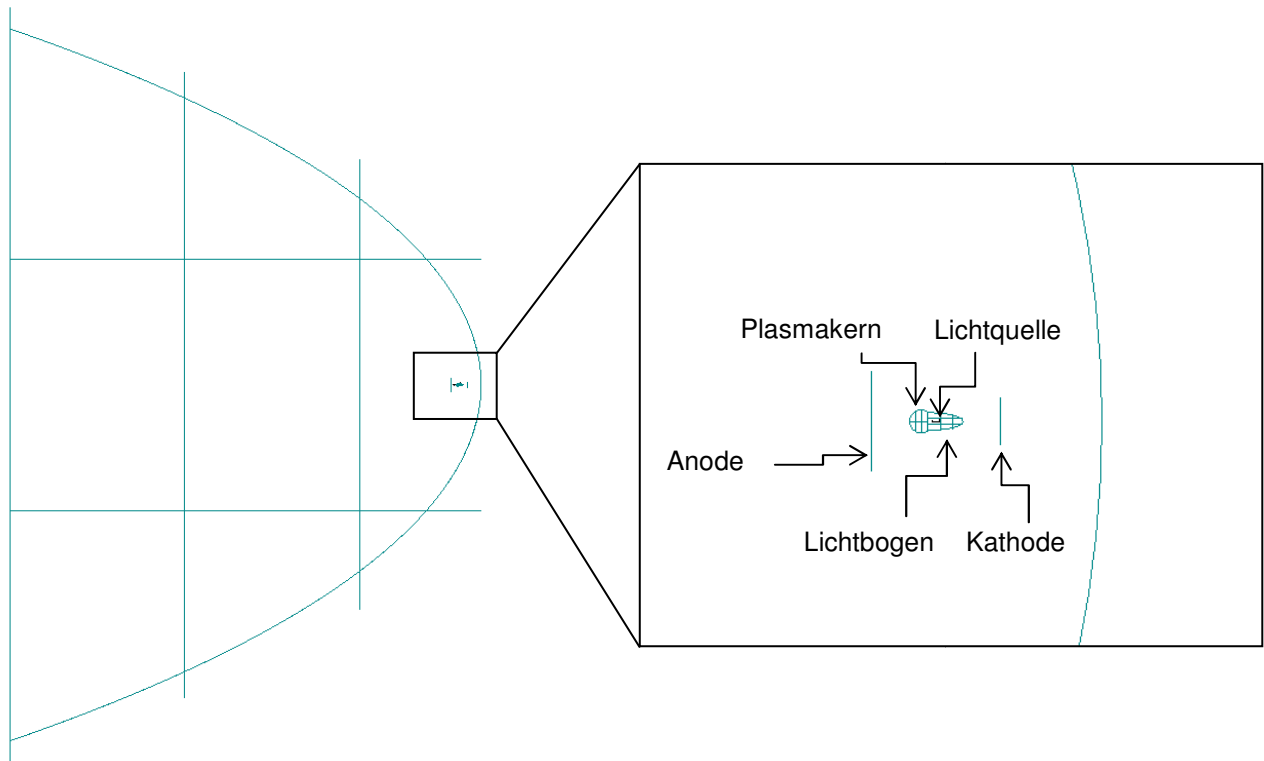


Abbildung 10 - Xenonblockmodell in OptiCAD

Im Macro folgt nach dem Startupteil die Definition des Targets. Es ist eine Fläche mit einer Absorption von 1 und einem aufgetragenen Radiometer, um die einfallende Strahlung messen und dokumentieren zu können. In Abbildung 11 sieht man die erforderlichen Befehle für ein rundes Target mit 1000mm Durchmesser und einem Radiometer mit 250 mal 250 Pixeln. Das Target ist 200mm aus dem Fokus nach vorne verschoben.

```

27 # >          Object definition: film
28 define/film/oval film 500 500
29 modify/surface/attributes film 0 1 0 0
30 place/xyz film 0 0 200
31 #rotate/local/y film 90
32 translate/global film 0 0 0
33 radiometer/attach film 250 250

```

Abbildung 11 – Targetdefinition

Nacheinander werden die einzelnen Komponenten des Xenonblocks aufgerufen. Zunächst die Koordinatensysteme an denen sich alle weiteren Bestandteile des Xenonblocks orientieren.

```
36 #macro/name="R500/laser/laser.mac"
37 macro/name="R500/control/control_lines.mac"
38 macro/name="R500/positioning/positioning_R500_1st.mac"
39 #macro/name="R500/positioning/even/positioning_R500_even.mac"
40 #macro/name="R500/positioning/Neue Skalierung/positioning_R500.mac"
41 #macro/name="R500/positioning/Neue Skalierung/positioning_R500_2.mac"
42 macro/name="R500/light/arc_lines.mac"
43 macro/name="R500/electrodes/electrodes.mac"
44 macro/name="R500/mirror/mirror_new.mac"
45 macro/name="R500/scatterer/scatterer_R500.mac"
46 macro/name="R500/light/light_test.mac"
47 #macro/name="R500/ray_test/ray_test.mac"
48 #macro/name="R500/ray_test/ray_test2.mac"
49 macro/name="R500/ray_test/short/ray_test_short.mac"
```

Abbildung 12 - Hauptteil des Macros

Der Aufbau des Hauptteils des Macros ist in Abbildung 12 zu sehen. Das Macro „Laser“ zeichnet die Zielpunkte zur Einstellung der Strahler von hinten auf das Target, dann werden die Koordinatensysteme (control), deren Positionierung (positioning), die Darstellung von Lichtbogen und Plasmakugel (arc_lines), den Elektroden (electrodes), der Spiegel (mirror_new) der Streuung (scatterer) und die Lichtquellen (light_test) geladen. Das Macro „ray_test_short“ führt für jede Lampe eine Simulation von 100.000 Strahlen durch.

Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden die einzelnen Komponenten der Xenonblöcke zeilenweise aufgerufen. So kann eine Fehlersuche schnell durchgeführt werden. Die Macros im Hauptmacro verweisen auf zeilenweise arbeitende Macros, daher ist jedes Macro auf einem Bildschirm komplett darstellbar. Abbildung 13 zeigt beispielhaft das Macro „mirror“ welches die Spiegel der Lampen aufruft. Im Beispiel werden die Spiegel für das Macro 500x500 aufgerufen, also für eine Targetgröße von 500 mal 500mm

```
1 macro/name="500x500/mirror/mirror_A.mac"
2 macro/name="500x500/mirror/mirror_B.mac"
3 macro/name="500x500/mirror/mirror_C.mac"
4 macro/name="500x500/mirror/mirror_D.mac"
5 macro/name="500x500/mirror/mirror_E.mac"
6 macro/name="500x500/mirror/mirror_F.mac"
7 macro/name="500x500/mirror/mirror_G.mac"
8 macro/name="500x500/mirror/mirror_H.mac"
9 macro/name="500x500/mirror/mirror_I.mac"
10 macro/name="500x500/mirror/mirror_J.mac"
11 macro/name="500x500/mirror/mirror_K.mac"
12 macro/name="500x500/mirror/mirror_L.mac"
13 macro/name="500x500/mirror/mirror M.mac"
```

Abbildung 13 - Macro "mirror"

Anschließend werden in Abbildung 14 die ersten zwei Befehlssätze für die Spiegel gezeigt. Hier sind es die Spiegel für die Reflektoren der Xenonblöcke A1 und A2, im weiteren Verlauf des Macros folgen die Befehlssätze die Reflektoren bis A11. Analog wird es bis „mirror_M“ fortgesetzt, ebenso gilt dieser Aufbau auch für alle weiteren Macros.

```
1 #####
2 #
3 # >      Object definition: A1_mirror
4 #def/cavity/ellip/both A1_mirror  900 900 4100 3400 4100
5 #mod/surf A1_mirror.1 refl= 0.9 abs = 0.1
6 #place/relative A1_mirror A1_control  0 0 -4000
7 #<
8 #####
9 #
10 # >      Object definition: A2_mirror
11 #def/cavity/ellip/both A2_mirror  900 900 4100 3400 4100
12 #mod/surf A2_mirror.1 refl= 0.9 abs = 0.1
13 #place/relative A2_mirror A2_control  0 0 -4000
14 #<
15 #####
```

Abbildung 14 - Erste zwei Befehlssätze des Macros "mirror_a"

Abgeschlossen wird das Macro mit dem Befehl, die Daten des Radiometers in eine CSV-Datei zu schreiben (Abbildung 15), die im Anschluss zur Auswertung benötigt werden. Hierbei wird jeder Pixel des Radiometers mit der zugehörigen Flussdichte gespeichert sowie Daten zur Gesamtleistung des System, Leistung auf dem Target und der minimalen bzw. maximalen Flussdichte. Anschließend wird die Radiometeransicht in OptiCAD gezeigt.

```
54 radiometer/fileout/name="R500/spotsdata_aktuell/1st_Target_+200.csv" film
55 view/radiometer film
```

Abbildung 15 - Speichern der Radiometerdatei

4.3. Darstellung der Ergebnisse

OptiCAD ist in der Lage, die Daten des simulierten Radiometers zu visualisieren. Dazu gibt es eine Grafik mit zusätzlichen Informationen über das Radiometer aus.

Die Grafik zeigt das Radiometerbild aus OptiCAD, welches bei einem Target mit dem Radius 500mm und der Position +250mm simuliert wurde.

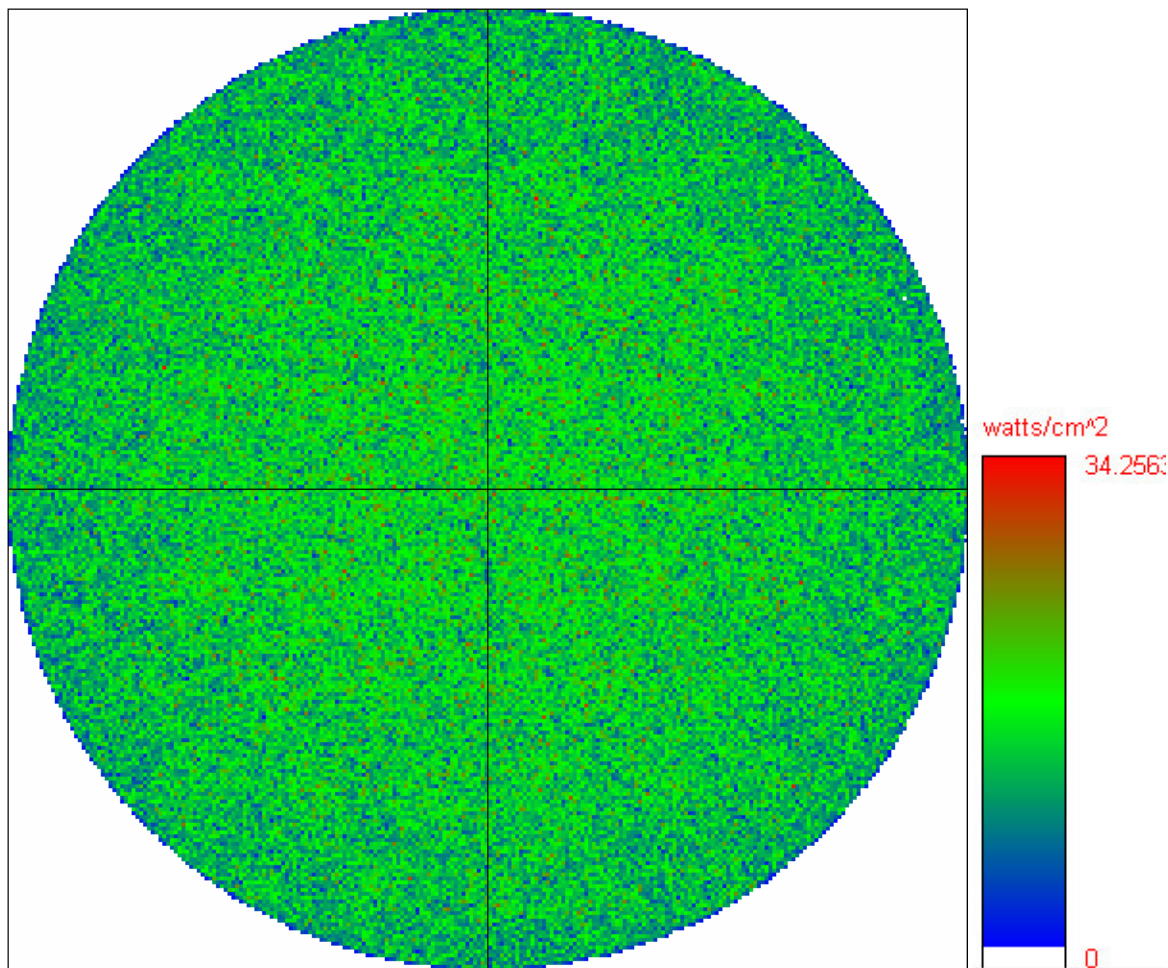


Diagramm 3 - Radiometerbild

In Diagramm 3 ist eine sehr homogene Flussdichteverteilung zu erkennen. In der Mitte ist der Grünanteil deutlich höher als am Rand; dieser ist eher bläulich gefärbt. Daher ist die Flussdichte in Mitte höher als am Rand, wie es auch zu erwarten ist. Angezeigt werden in der Skala rechts neben dem Diagramm die niedrigsten bzw. höchsten Flussdichtewerte, die auf dem Target auftreten. Die hier angegebene Flussdichte von 34,26 W/cm² (342 kW/m²) bezieht sich auf den bzw. die Radiometerpixel (Bin) in denen die höchste Flussdichte simuliert wurde.

Zusätzlich zu dem Diagramm gibt OptiCAD noch weitere Informationen, die auch in der gespeicherten Radiometerdatei hinterlegt sind.

Irradiance Map (Power/Area)

Object: film

Film Full Size: 1000 x 1000 (mm)

Number of Bins: 250 x 250

Bin Full Size X: 4 (mm)

Bin Full Size Y: 4 (mm)

Bin Area: 1.600E+001 (mm)²

Total System Power 2.541e+005 (watts)

Radiometer Power 1.064e+005 (watts)

R.M.S. Uniformity 6.632 (watts/cm²)

Abbildung 16 – Radiometerinformationen

Den Informationen ist zu entnehmen, dass es sich um eine „Messung“ der Einstrahlung handelt. Das Object „Film“ wurde als Target verwendet. Die Größe des Radiometers/Targets beträgt 1000 mal 1000mm. Die Form ist hierbei nicht entscheidend, angegeben wird die größte Ausdehnung.

Das Radiometer verfügt über 250x250 Pixel (Bins); diese sind die Auflösung des Radiometers. Der Wert wurde so niedrig gewählt, um eine Weiterverarbeitung mit gängigen Office-Programmen zu ermöglichen.

Die Größe der Pixel beträgt 4 mal 4mm. Angegeben wird hierbei auch die Fläche von 16mm².

Die Total System Power ist die Gesamtleistung aller Lichtquellen zusammen, die Radiometer Power entspricht der Leistung, die auf dem Target auftrifft. Daraus lässt sich schnell ein Wirkungsgrad des Gesamtsystems berechnen.

Der letzte angegebene Wert „R.M.S Uniformity“ scheint ein Maß für die Homogenität der Flussdichte zu sein, allerdings bietet OptiCAD selbst keine Literatur, die erklärt, wie dieser Wert berechnet wird. Daher kann er für die folgenden Untersuchungen nicht herangezogen werden.

4.3.1. Glätten der Ergebnisse

Um die Ergebnisse zu glätten, wird ein Medianfilter verwendet. Dieser glättet lokale Ausreißer und dämpft einzelne Spitzen.

Ein Medianfilter verwendet eine Zahlenreihe mit vorher festgelegter Breite, die aus den zu glättenden Daten entnommen wird. Diese werden dann in aufsteigender Reihenfolge sortiert und der mittlere Wert (nicht Mittelwert), wird in die Zelle geschrieben. Zentrum ist immer die Zelle, in die der Wert geschrieben wird. Bei einer Filterbreite von 7 würde man für die Datenauswahl drei Zellen nach links und 3 Zellen nach rechts gehen.

Aus der Zahlenreihe {3;8;5;9;100;1;4} entsteht beispielsweise nach Sortieren nach aufsteigender Größe die Zahlenreihe {1;3;4;5;8;9;100}. Daraus wird der mittlere Wert „5“ in die Zelle geschrieben. Mittelwert dieser Reihe wäre 18,57. Dadurch werden Spikes in der Messung verhindert. Die Breite für diesen Medianfilter beträgt 7. (Huang, Yang, Tang, 1979)

Je größer die gewählte Breite ist, desto glatter wird das Ergebnis, allerdings besteht die Gefahr, dass die Ergebnisse deutlich verfälscht werden. Gewählt wurde eine Filterbreite von 3, da diese nur Peaks in einzelnen Pixeln des Radiometers entfernt.

4.4. Zielgrößen der Simulation

Um die Qualität der Flussdichteverteilung bewerten zu können müssen Parameter definiert werden. Hauptparameter ist die durchschnittliche Flussdichte, die auf dem Target auftrifft. Des Weiteren ist die Differenz zwischen der maximalen und minimalen Flussdichte ein Maß dafür, wie flach die Flussdichteverteilung ist. Abschließend ist die Gesamtleistung, die auf dem Target auftrifft wichtig für die Bilanzierung der Energieflüsse für Experimentatoren.

Die maximale Flussdichte wird definiert als Mittelwert von 11 mal 11 Radiometerpixel in der Mitte des Targets. Die minimale Flussdichte entspricht dem Mittelwert einer ebenso großen Fläche am Rand des Targets. Der Mittelwert einer Fläche am Rand reicht aus Symmetriegründen aus, daher müssen nicht vier oder mehr Flächen gewählt werden.

5. Validierung der Randbedingungen

Zunächst wird ein Test durchgeführt, um das gefundene Modell bestehend aus Reflektivität und Strahlaufweitung zu bestätigen. Der Hochleistungsstrahler des DLR in Köln-Porz bestehend aus 10 Xenonblöcken mit 3 Metern Brennweite soll mit den Streuungs- und Reflexionsdaten nachgestellt werden. Die Ergebnisse werden dann mit der bereits bestimmten und bekannten Daten verglichen.

Bei der Simulation werden 10.000 Strahlen pro Lampen verwendet.

In Diagramm 4 ist die simulierter Flussdichteverteilung dargestellt, in Diagramm 5 dagegen die gemessene Flussdichteverteilung.

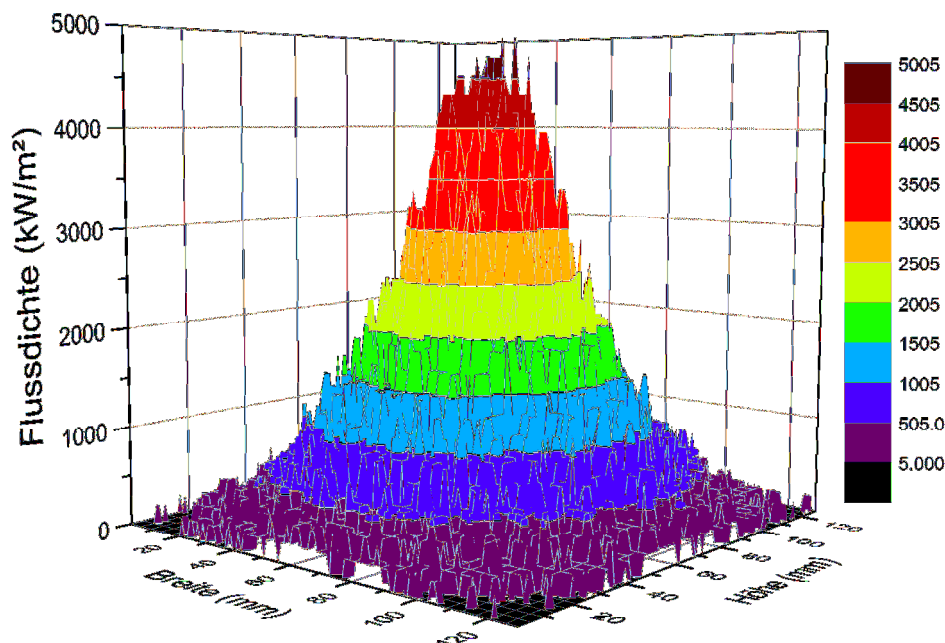


Diagramm 4 - Flussdichte des HLS Köln (simuliert)

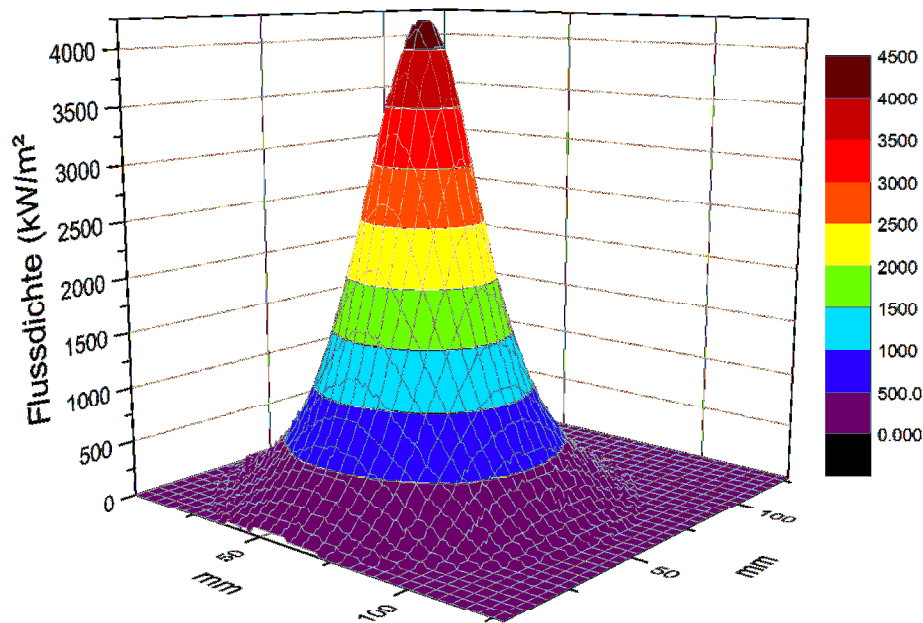


Diagramm 5 - Flussdichte des HLS Köln (gemessen)

Beim Vergleich der Diagramme 4 und 5 fällt auf, dass die Fußbreite der Gaußverteilung in Diagramm 5 etwas kleiner ist. Die Flussdichte des 10%-Radius beträgt bei beiden Verteilungen 3,8 MW/m².

Diagramm 5 ist deutlich glatter, was damit zu erklären ist, dass die reale Messung einer Simulation mit endlos vielen Strahlen gleicht.

Durch die Endlichkeit der Strahlen können lokale Ausreißer entstehen, da bei der Simulation die Menge der Strahler pro Bin gezählt wird. Die Leistung eines Strahls entspricht der Lampenleistung geteilt durch die Anzahl der Strahlen pro Lampe. Bei endlos vielen Strahlen geht die Leistung eines Strahls gegen 0, dadurch werden einzelne Ausreißer im Diagramm nicht sichtbar.

Die beiden Flussdichteverteilungen werden mit einem Gauß-Fit versehen (Diagramm 6 und 7).

Die Fit-Funktion lautet

$$f(x) = y_0 + A * e^{-0,5 * (\frac{x-x_0}{\sigma})^2}$$

Mit : y_0 = Offset (Verschiebung auf der y-Achse) x = Messwert x_0 = Erwartungswert

A = Höhe der Kurve σ = Standardabweichung (enthält 68,3% der Messwerte)

Gauß-Fit der gemessenen Flussdichte am HLS

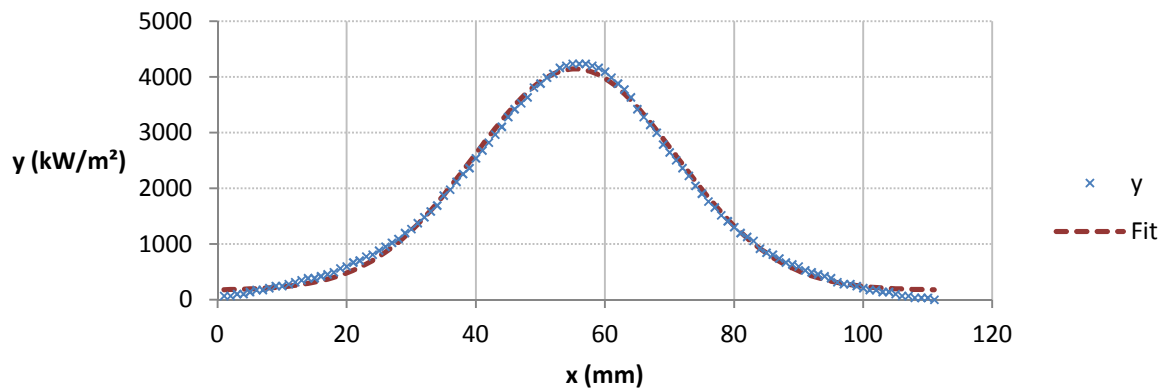


Diagramm 6 - Gauß-Fit der gemessenen Flussdichte des HLS

Gauß-Fit der simulierten Flussdichte am HLS

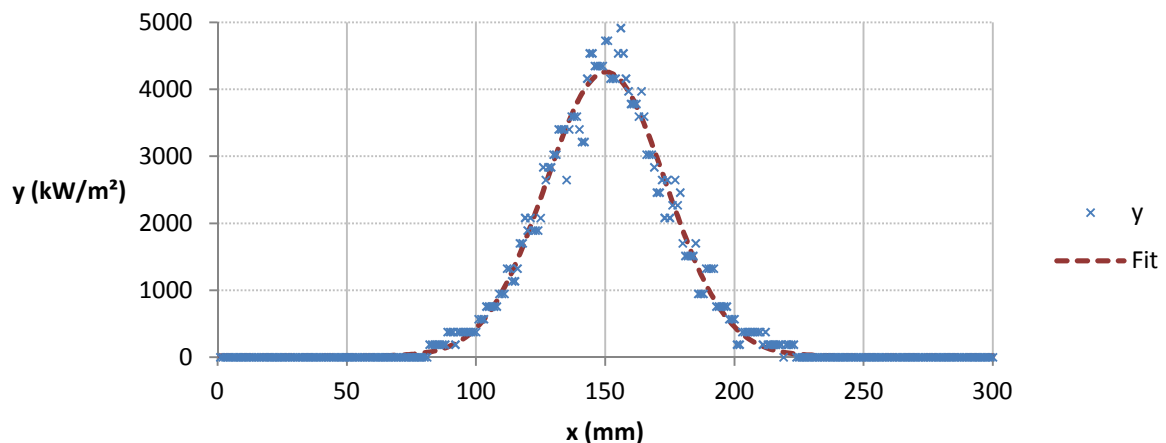


Diagramm 7 - Gauß-Fit der simulierten Flussdichteverteilung des HLS

Stellt man die Parameter der Gaußkurven gegenüber erkennt man, dass die Kurve der simulierten Flussdichte etwas höher liegt und breiter ist (Tabelle 1).

Tabelle 1 - Gegenüberstellung der Gauß-Fits der gemessenen und simulierten Flussdichteverteilungen

		Gemessen	Simuliert
Offset	y_0	170 kW/m ²	20,2 kW/m ²
Höhe	A	3971,7 kW/m ²	4237,1 kW/m ²
Erwartungswert	x_0	55,4	150,3
Standardabweichung	σ	15,7 mm	23,3 mm

Die Höhen der Gaußkurven der gemessenen und simulierten Flussdichteverteilungen haben eine Abweichung von nur 6,3% wobei die simulierte höher ist. Die Standardabweichungen der Gaußkurven unterscheiden sich um 32,6%; auch hier ist die simulierte höher. Mögliche Ursachen können sein, dass die Qualitäten der Spiegel und der Proben unterschiedlich sind. Die Integrale der beiden Kurven weichen um 29,5% voneinander ab, wobei das der simulierten Gaußkurve größer ist.

Da der Peak-Flux (Leistung im 10%-Leistungsradius), passend ist und die Höhen der Gaußkurven eine Abweichung von nur 3,7% haben, wird das Modell angenommen und verwendet.

6. Zielpunktstrategie

Unter Zielpunktstrategie versteht man eine Positionierung der Normalenvektoren der Spiegel eines Heliostatfeldes auf dem Absorber, mit dem Ziel, möglichst viel Strahlung auf den Absorber zu reflektieren. Beschränkendes Kriterium ist der Maximalgrenzwert der Flussdichte, dessen Überschreiten den Absorber beschädigen kann. Vorgegangen wird dabei, am Beispiel des Solarturms Jülich, so, dass alle Spiegel auf die Mitte des Absorbers eingestellt werden. Wird die Flussdichte zu hoch, werden einzelne Spiegel von der Mitte in Randbereiche verlegt, an denen die Flussdichte geringer ist. Dies geschieht so lange, bis der Flussdichtegrenzwert nicht mehr überschritten wird. Da es sich bei Turmkraftwerken um dynamische Systeme handelt, muss auch die Regelung des Heliostatfeldes dynamisch arbeiten, um die Heliostaten bei Wolkendurchgang wieder so zu positionieren, dass die Flussdichte maximiert wird, ohne den Grenzwert zu überschreiten. (Belhomme, Pitz-Paal, Schwarzbözl, 2014)

6.1. Zielpunktstrategie für den mHLS

Da im Falle der Zielpunktstrategie für den mHLS keine Dynamik nötig ist können einfachere Systeme verwendet werden. Außerdem sind die Flussdichteverteilungen, die erreicht werden sollen, anders charakterisiert. Typische Betriebsfälle des mHLS beinhalten die maximale Flussdichte um Hochtemperaturanwendungen bedienen zu können sowie möglichst flache Flussdichtedistributionen für die meisten anderen Experimente.

Um die Zielpunktstrategie für den mHLS zu entwickeln, werden die Lampenzielpunkte zunächst gleichmäßig auf dem Target verteilt. Von dort ausgehend werden weitere Schritte zur Verbesserung der Flussdichteverteilung unternommen.

In der Grundeinstellung sind alle Lampen auf die Mitte des Targets fokussiert. Um die Zielpunkte der Lampen auf dem Target zu positionieren, werden von hinten auf das Target einzelne Strahlen an den gewünschten Zielpunkten aufgebracht. Anschließend werden die Lampen des mHLS iterativ verstellt bis die Zielpunkte der Lampen mit den von hinten aufgebrachten Zielstrahlen deckungsgleich sind. Da sich der Nullpunkt in der Mitte des Targets befindet, muss aus Symmetriegründen jeweils nur ein Viertel der Lampen auf diese Art bestimmt werden, die restlichen Verstellwinkel können mit geänderten Vorzeichen übertragen werden.

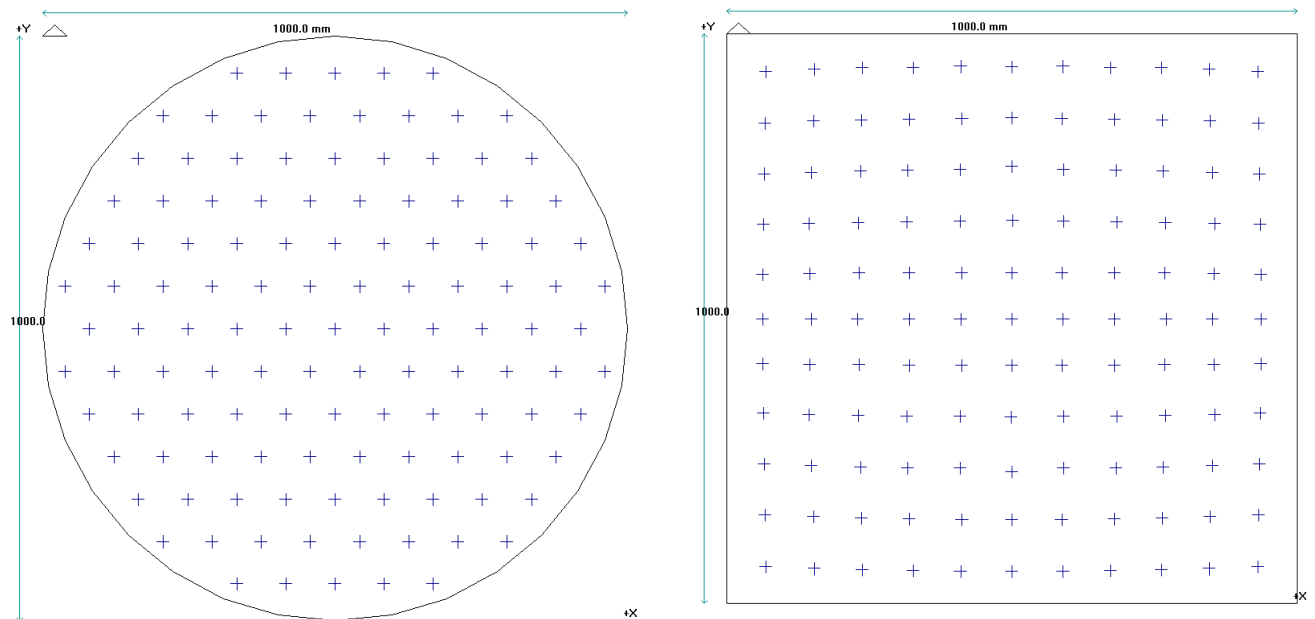


Abbildung 17 - Zielpunktverteilung auf dem Target: Links Rund $\varnothing=1000\text{mm}$, Rechts Quadrat $1000\text{mm} \times 1000\text{mm}$

Mit einer gleichmäßigen Verteilung der Lampenzielpunkte auf dem Target mit 1000mm Durchmesser wird begonnen (Abbildung 17, links).

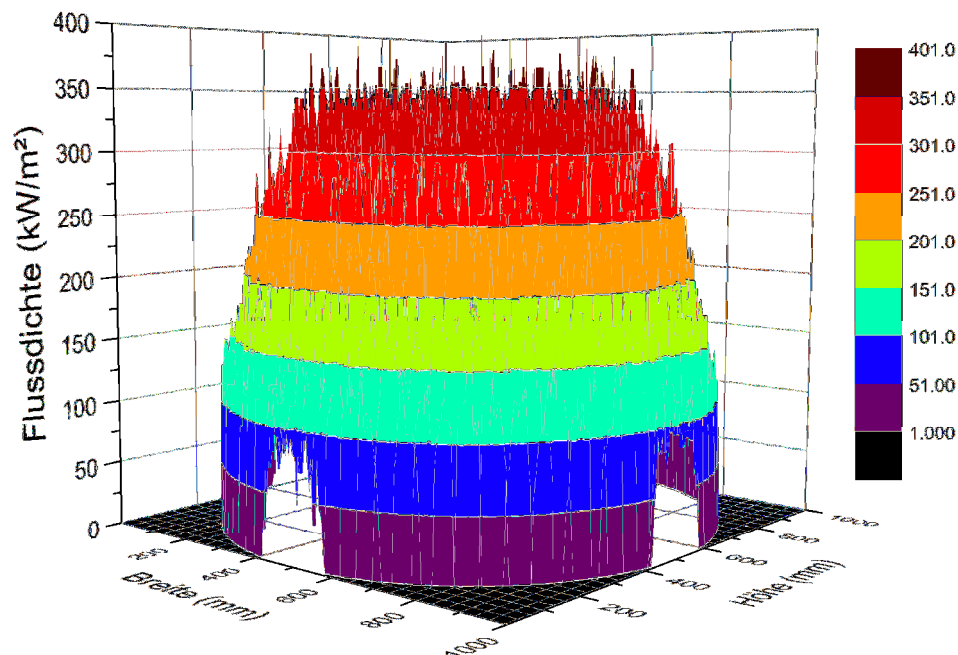


Diagramm 8 - Erster Schritt der Zielpunktstrategieentwicklung

Im

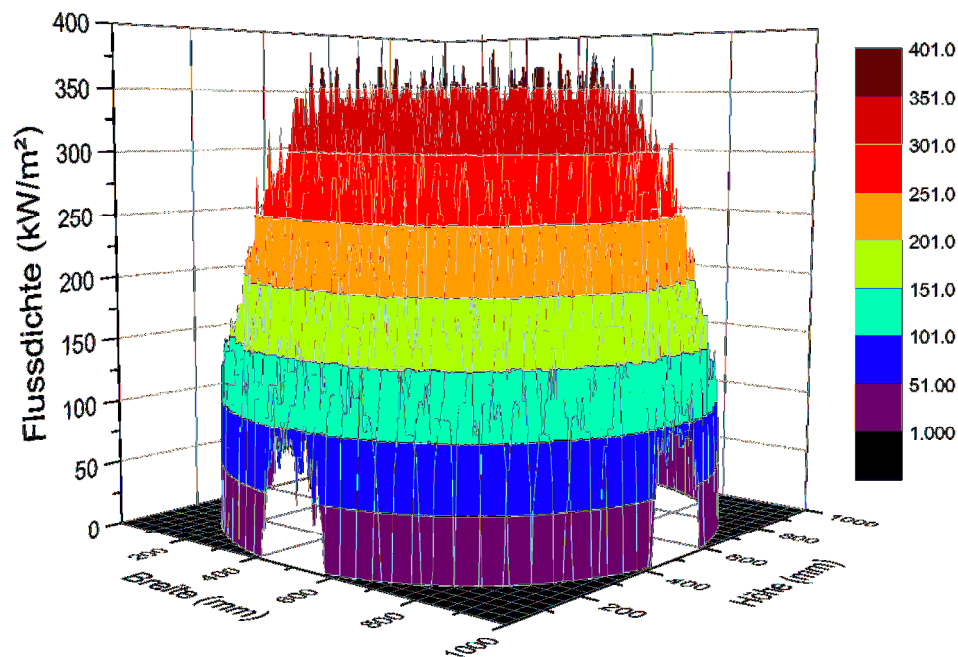


Diagramm 8, der ersten Flussdichteverteilung, erkennt man in der Mitte ein flaches Plateau, das zu den Seiten hin abfällt. Das Plateau nimmt etwa 60% der Fläche ein. Ziel der weiteren Optimierung ist es, eine flache Flussdichteverteilung über das gesamte Target zu erreichen.

Zur besseren Übersichtlichkeit und zum Herausfiltern von Ausreißern wird ein Medianfilter verwendet.

Ein Lösungsansatz besteht darin, dass einzelne Lampen von innen nach außen verstellt werden, um die Flussdichte in der Mitte abzusenken und am Rand zu erhöhen. Da diese Möglichkeit allerdings keine gleichmäßige Flussdichteverteilung hervorbringt, wurde dieser Ansatz wieder verworfen.

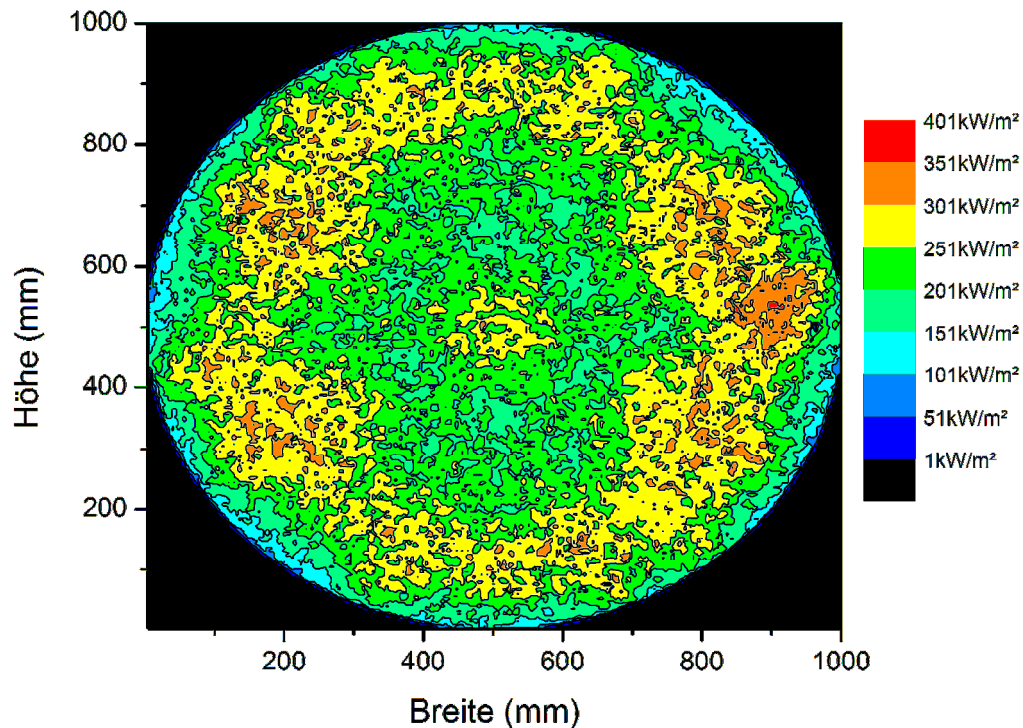


Diagramm 9 - Flussdichteverteilung bei Verschiebung einzelner Xenonblöcke

In Diagramm 9 ist die Flussdichteverteilung bei Verschiebung einzelner Xenonblöcke zu sehen. Durch Verstellen der Lampenfokuspunkte von innen nach außen für einen deutlichen Abfall der Flussdichte in der Mitte. Bereits das Verstellen einer einzelnen Lampe hinterlässt ein „Loch“. Daher musste für eine homogene Verteilung ein neuer Lösungsansatz gefunden werden.

Der zweite Lösungsansatz bedient sich der ersten Zielpunktverteilung und variiert die Abstände zwischen den Zielpunkten. Damit soll erreicht werden, dass das flache Plateau des ersten Schrittes ausgeweitet wird, bis die schrägen Flanken nicht mehr auf dem Target sind. Manko dieser Variante ist, dass die Gesamtleistung auf dem Target verringert wird, da einzelne Lampenfoki nicht mehr auf dem Target liegen und daher weniger Strahlung auf dem Target auftrifft.

Um die zeitaufwendige Positionierung jeder einzelnen Lampe zu vermeiden, werden die Lampen auf eine Grundposition eingestellt und dann das Target auf der z-Achse verschoben. Da die Lampen auf einer Kugeloberfläche angeordnet sind, werden die Zielpunkte bei der Bewegung des Targets in Richtung Strahler auseinander bewegt. Beim Verschieben des Targets nach hinten, bewegen sich die Zielpunkte aufeinander zu.

Im Folgenden ist eine Serie von 4 Simulationen gezeigt. Das Target ist rund und hat einen Durchmesser von 1000mm. Variiert wird die Position des Targets in positiver z-Richtung mit den Werten 0 (Diagramm 10); 100mm (Diagramm 11); 200mm (Diagramm 12) und 300mm (Diagramm 13).

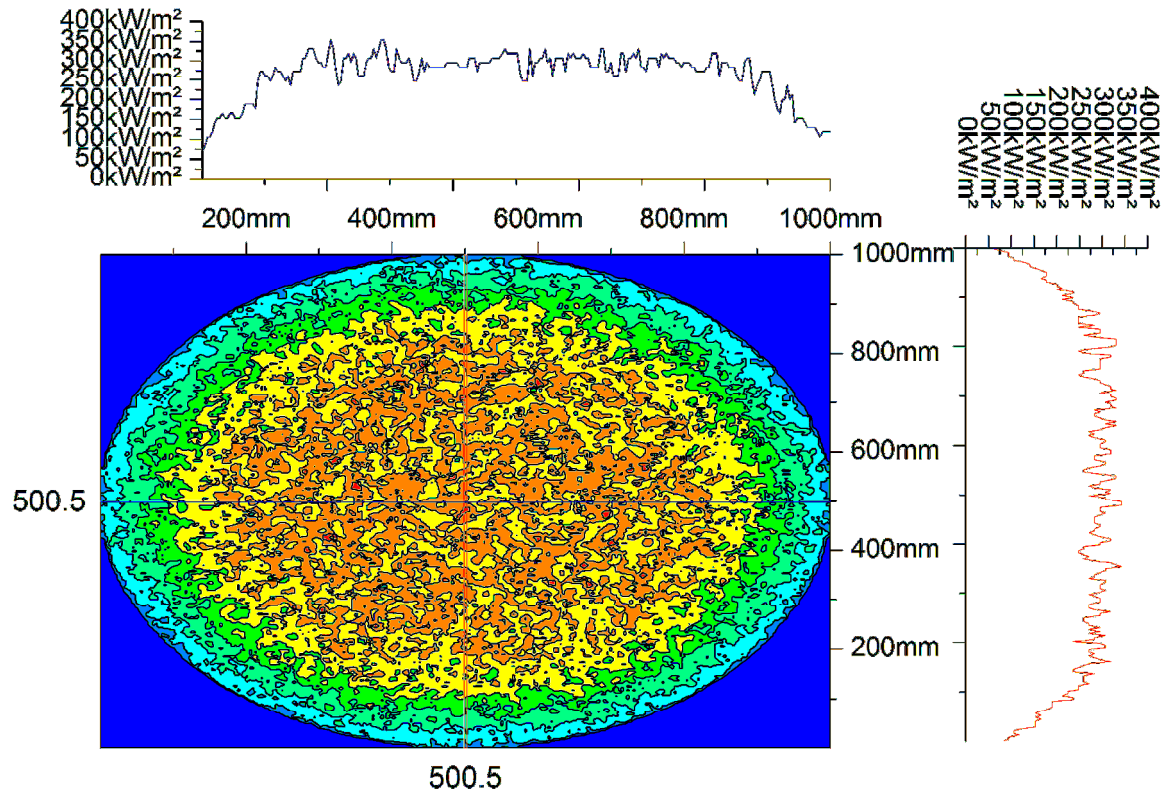


Diagramm 10 - Flussdichteverteilung Target R500 Position 0mm

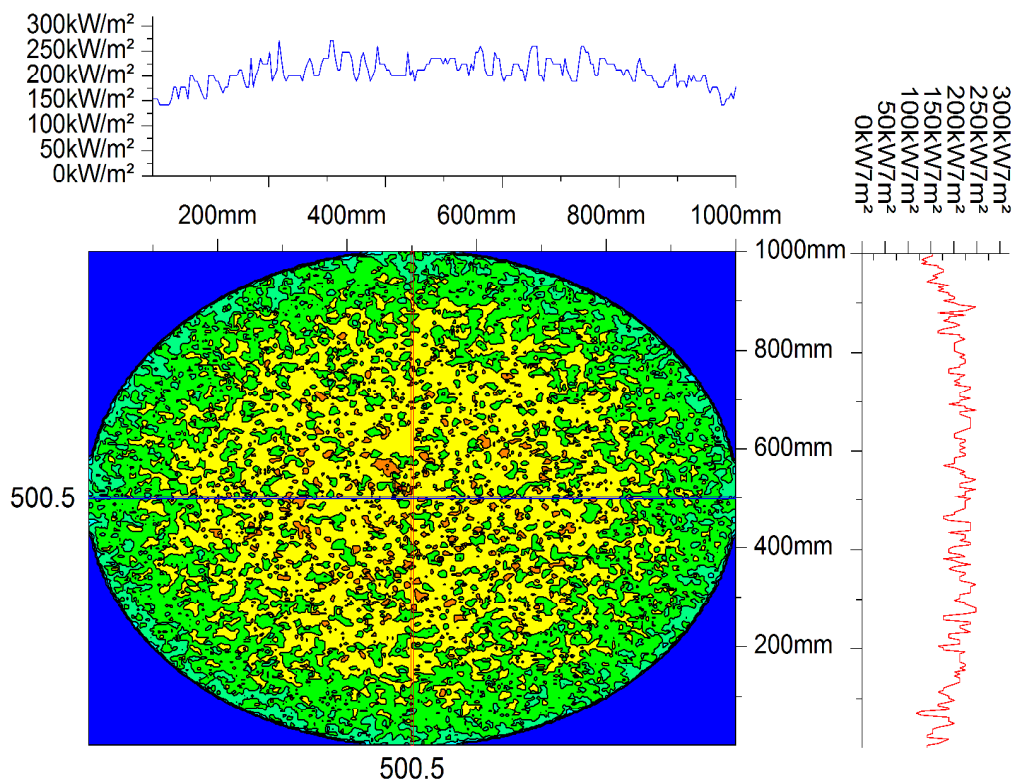


Diagramm 11 - Flussdichteverteilung Target R500 Position +100mm

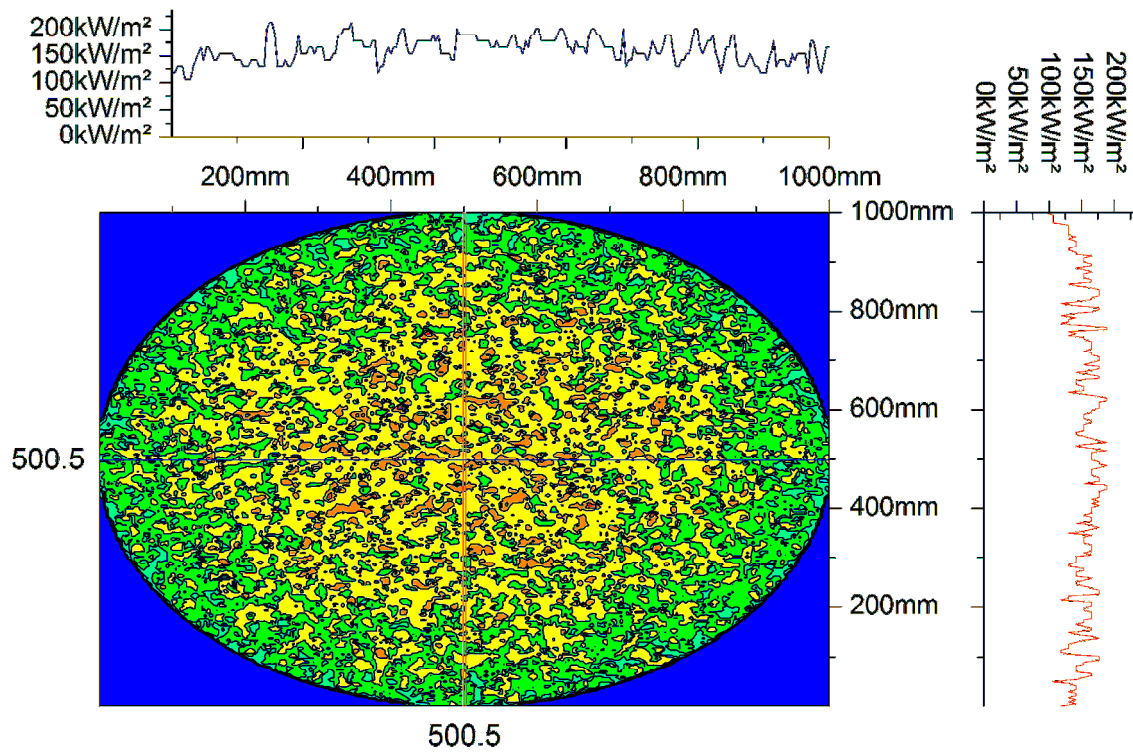


Diagramm 12 - Flussdichteverteilung Target R500 Position +200mm

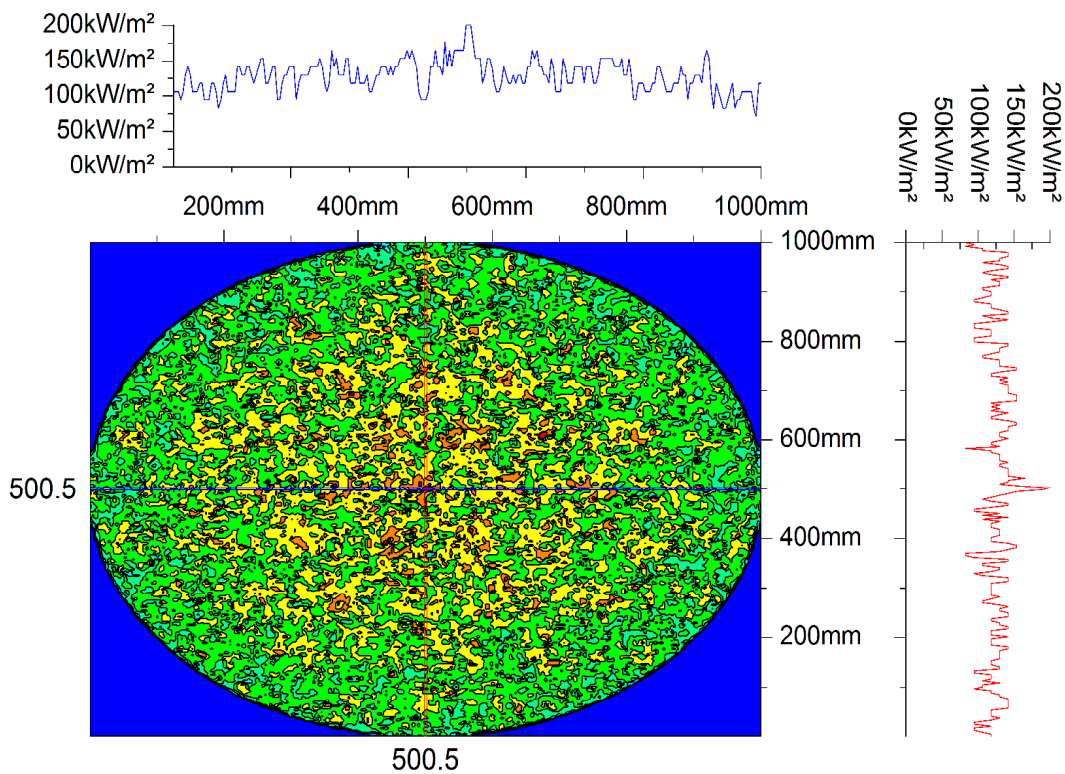


Diagramm 13 - Flussdichteverteilung Target R500 Position +300mm

Die Flussdichteverteilungen werden mit zunehmender Bewegung in positiver z-Richtung immer homogener. Zu erkennen ist dies an den Profillinien oberhalb und rechts neben dem Konturdiagramm. Anfangs (Diagramm 10) ist noch ein Flankenabfall zu sehen, der mit zunehmender Verschiebung nach vorne abnimmt. In Diagramm 13 ist dieser kaum noch zu erkennen. Die Differenz zwischen dem Wert in der Mitte und dem Randwert fällt von 166 kW/m^2 auf 26 kW/m^2 ab. Im Gegenzug fällt auch die mittlere Flussdichte von $243,35 \text{ kW/m}^2$ auf $121,63 \text{ kW/m}^2$ ab.

Deutlich zu erkennen ist, dass es sich bei der Homogenität der Verteilung um eine Optimierungsgröße handelt. Es muss abgewogen werden, ob eine hohe Flussdichte oder Homogenität für den Betrieb wichtiger sind, das ist für jedes Experiment unterschiedlich.

Das beschriebene Vorgehen kann für quadratische Proben analog übernommen werden.

7. Flussdichteprognose für den mHLS

Um die wichtigsten Kenndaten des mHLS zu bestimmen, wird zunächst die maximale Flussdichte des Strahlers simuliert. Anschließend wird die Zielpunktstrategie, die im vorangegangenen Kapitel erklärt wird, genutzt, um Kennlinien zu erzeugen. Dazu werden insgesamt 15 Simulationsrechnungen für jede Targetgröße durchgeführt. Angenommen werden kreisförmige sowie quadratische Targets, in deren Mitte der Fokuspunkt liegt. Die runden Targets haben Durchmesser von 250, 500, 1000 und 1500mm und die quadratischen Kantenlängen von 500, 750, 1000 und 1500mm. Zum Abschluss wird die Flussdichteverteilung für eine konkrete Experimentanfrage simuliert.

7.1. Bestimmung der maximalen Flussdichte

Um die maximal erreichbare Flussdichte zu bestimmen werden alle Xenonblöcke in der Grundposition belassen, sodass alle Reflektoren auf die Mitte des Targets zielen.

Durchgeführt wird die Simulation mit 10.000 Strahlen pro Lampe.

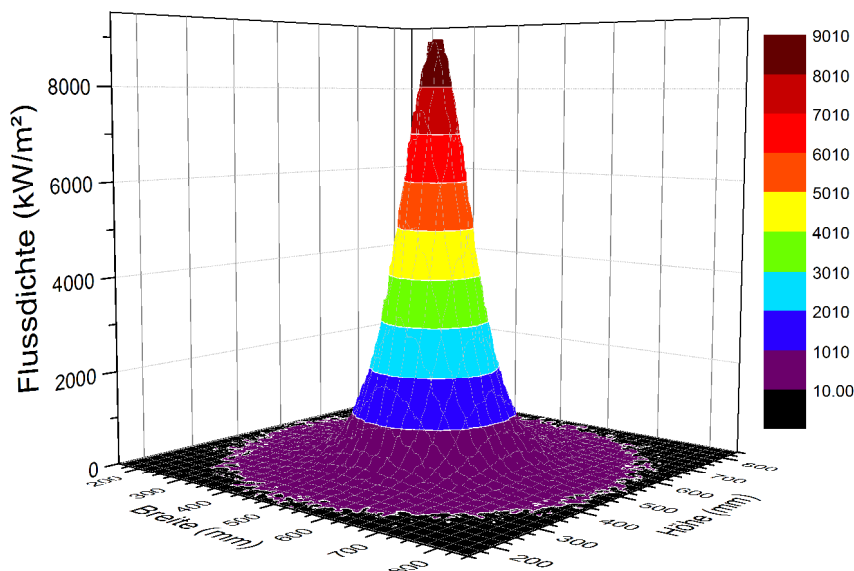


Diagramm 14 - Maximale Flussdichte 6kW Lampen

In Diagramm 14 sieht man die Flussdichteverteilung für den mHLS. Zu sehen ist eine schmale Gaußkurve. Die Spitze des Graphen reicht bis zu einer Flussdichte von 9,3 MW/m², da diese

Flussdichte aber nur in einem Bin von 16mm^2 auftritt, wird die Flussdichte im 10% Leistungsradius als Spitzenwert angegeben.

Der 10%-Leistungsradius hat einen Durchmesser von 5,8 cm und eine Flussdichte von $8,5\text{ MW/m}^2$. Diese entspricht der Peakflussdichte.

7.2. Grenzen der maximalen Flussdichte

Durch die Breite des Lichtflecks jeder Lampe, die durch die optischen Eigenschaften des Spiegels verursacht wird, ist die maximal erreichbare Flussdichte begrenzt. Nimmt die Oberflächenrauigkeit der Reflektoren ab, steigt die maximale Flussdichte, da dieselbe Leistung auf eine kleinere Fläche einstrahlt. Der Einfluss der Streuung an der Reflektoroberfläche wird in einem späteren Kapitel behandelt.

Es ist zudem nicht möglich, die Flussdichte einer Lampe oder eines bekannten Lampenarrays (z.B. HLS in Köln) durch einfaches Hochskalieren zu bestimmen. Durch die Anordnung auf einer Kugeloberfläche können nicht alle Lampen senkrecht auf das Target strahlen. Je weiter außen sich ein Xenonblock befindet, desto schräger strahlt er auf das Target. Die Abbildung ist dann nicht mehr kreisförmig, wie bei Xenonblock G6, welcher sich in der Mitte befindet, sondern wird zunehmend elliptischer.

Im Folgenden werden die Lampen G6 und G1 miteinander verglichen. G6 ist die zentrale Lampe, die genau orthogonal auf das Target leuchtet; G1 ist die äußerste Lampe der selben Zeile.

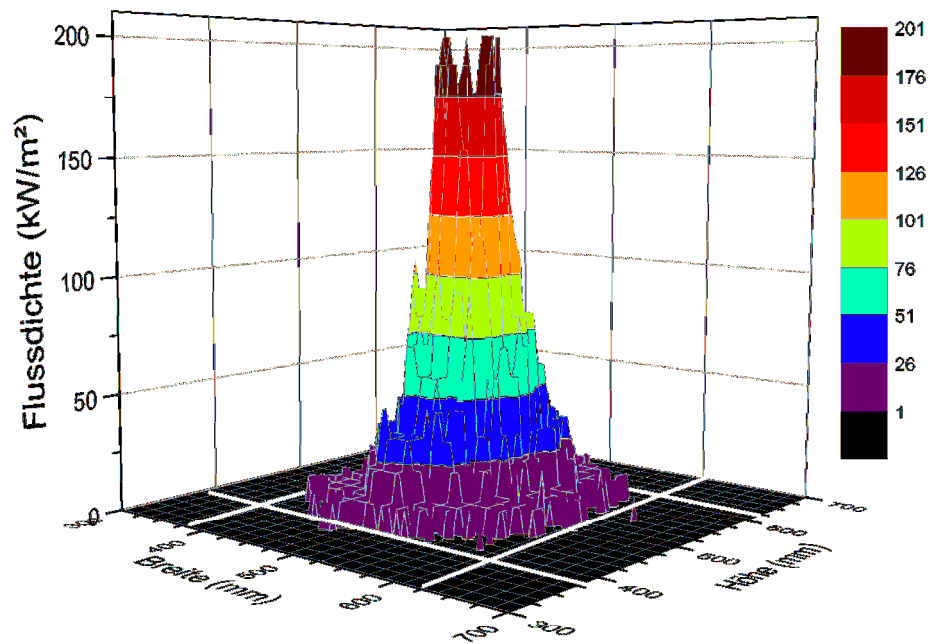


Diagramm 15 - Lampe G6 (senkrecht)

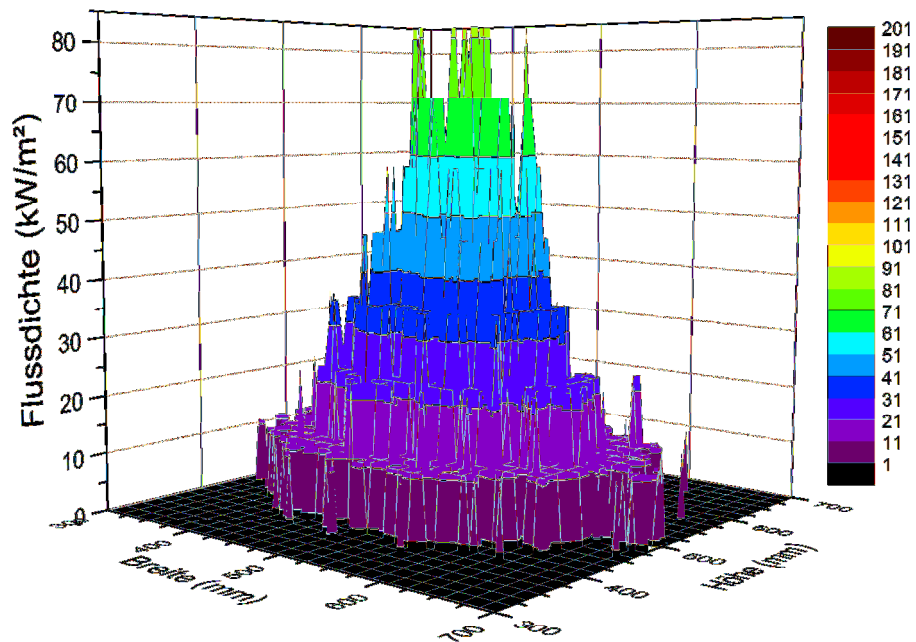


Diagramm 16 - Lampe G1 (schräg)

Die Diagramme (Diagramm 15 und (Diagramm 16 sind mit derselben Farbskala und denselben Maßstäben gezeichnet. Zu sehen ist, dass die senkrecht auf das Target leuchtende Lampe G6 eine Flussdichte von bis zu 200 kW/m^2 erzeugt. Die Abbildung ist ein runder Fleck mit einem Durchmesser von etwa 20 cm.

Bei der schräg auf das Target leuchtenden Lampe G1 fällt die maximale Flussdichte auf etwa 80 kW/m^2 ab. Die jetzt erzeugte Abbildung hat eine Höhe von etwa 20cm analog zur Lampe G6, die breite beträgt aber etwa 40cm, das Doppelte der ursprünglichen Abbildung.

7.3. Bestimmung der Betriebskennlinien

7.3.1. Bestimmung der Kennlinie für runde Targets

Zur Bestimmung der Kennlinien für runde Targets werden je 15 Simulationen mit verschiedenen Targetpositionen für alle 4 Targetgrößen durchgeführt. Aus den Ergebnissen werden die Leistung auf dem Target sowie die Differenz des Mittelwertes in der Mitte und des Mittelwertes am Rand (jeweils ein Array aus 11 mal 11 Feldern) über der Targetposition auf der z-Achse aufgetragen.

Die Targets werden mit R125, R250, R500 und R750 benannt. Die Nomenklatur steht für runde Targets mit Radien R von 125, 250, 500 und 750mm.

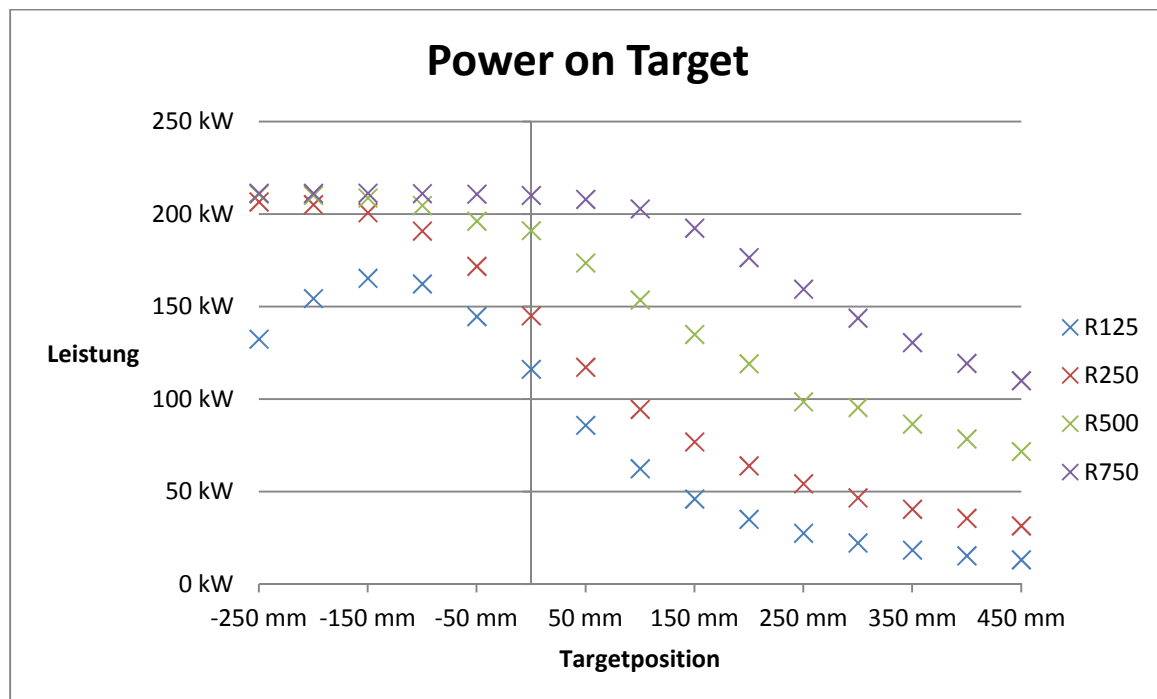


Diagramm 17 - Power on Target (runde Targets)

In Diagramm 17 sieht man die Leistungen, die auf dem Target auftreten, aufgetragen gegen die Position des Targets. Je größer das Target ist, desto höher ist auch die zu erwartende Leistung auf dem Target, da weniger Streustrahlung das Target verfehlt.

Das System verfügt über eine optische Leistung von 254 kW, davon werden 10% von den Spiegeln absorbiert. Die größte erreichbare Leistung auf dem Target beträgt also 229kW, unter der Annahme, dass die gesamte Strahlung das Target trifft. Daher laufen die Kurven im negativen x-Bereich asymptotisch gegen 229 kW. In positiver Richtung verläuft der Graph asymptotisch gegen 0 wobei dieser in der Realität nie erreicht wird, da das Target solange es vor dem mHLS aufgebaut ist, immer mit Strahlung beaufschlagt wird.

Die maximale simulierte Leistung auf dem Target beträgt 211 kW. In diesem Fall verfehlen 7,6% der Strahlen das Target.

Die Leistung auf dem Target nimmt mit der Bewegung des Targets in positiver z-Richtung ab. Das ist darin begründet, dass sich die Lampenzielpunkte auf dem Target bis über den Targetrand nach außen verschieben.

Im Ausnahmefall des sehr kleinen Targets R125 geschieht dies auch auf dem Weg in negativer z-Richtung jenseits der Position -150mm, da dort der Brennfleck der Flussdichteverteilung liegt und sich die Lampenzielpunkte mit weiterer Verschiebung nach hinten wieder weiter voneinander entfernen. Bei größeren Targets wird dieser Punkt nicht erreicht, da der maximale Verfahrweg zu klein ist.

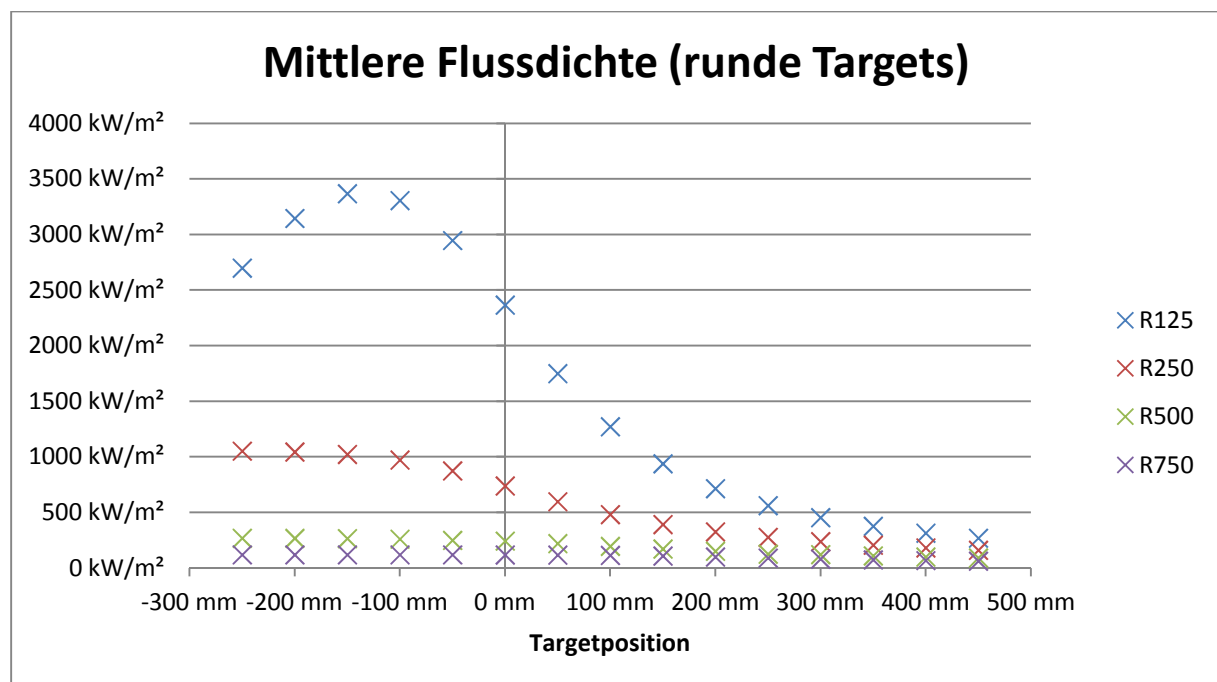


Diagramm 18 - Mittlere Flussdichte (runde Targets)

Diagramm 18 zeigt die mittlere Flussdichten, die auf die Targets auftreten. Auch hier fällt beim Target R125 das absolute Maximum auf, welches bei -150mm liegt. Die anderen drei Kennlinien laufen im

negativen Bereich in eine Sättigung, die der maximalen Leistung auf dem Target geteilt durch die Fläche des Targets entspricht. In positiver z-Richtung werden die mittleren Flussdichten geringer. Die Kurvenverläufe entsprechen denen aus Diagramm 17, mit einem individuellen Vorfaktor für jede Kurve.

Da das Target R125 Flussdichten von bis zu 3,4 MW/m², die andern nur Werte von bis zu 1,1 MW/m² erreichen, werden diese Werte klein und schlecht ablesbar, daher wurde das Diagramm noch einmal vergrößert dargestellt (Diagramm 19).

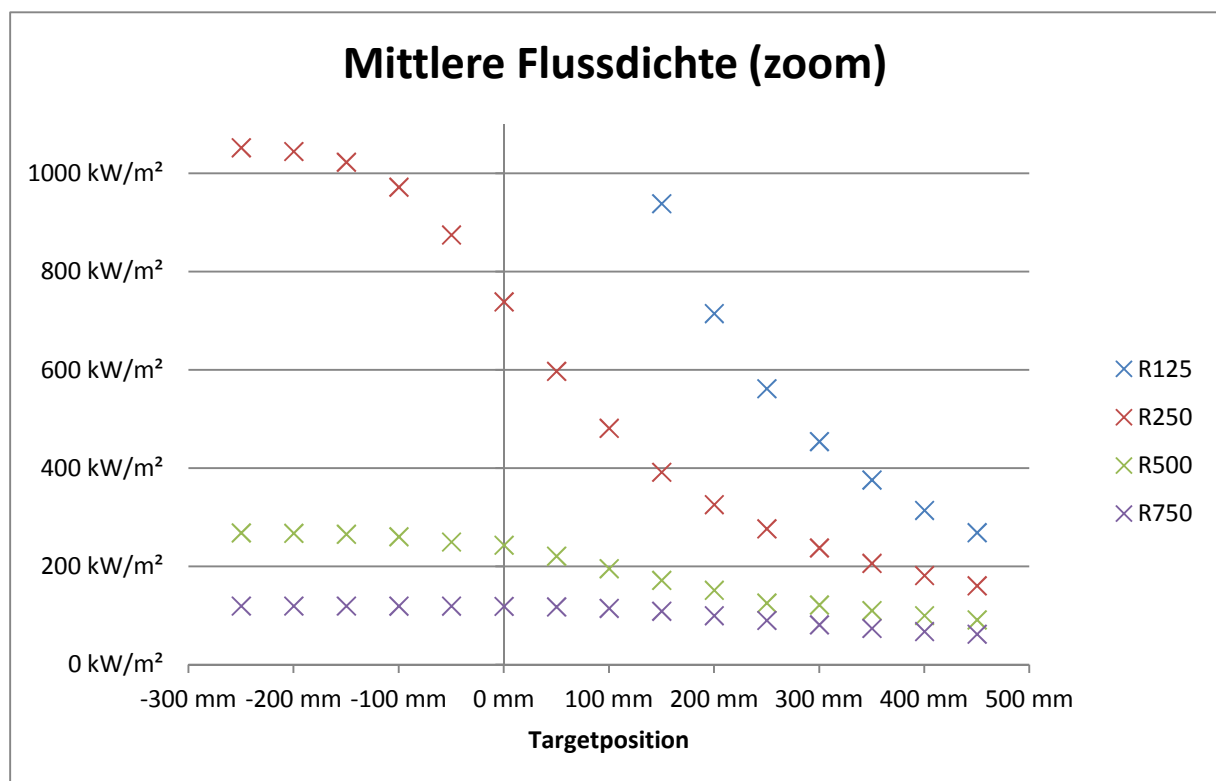


Diagramm 19 - Mittlere Flussdichte (runde Targets, Zoom)

In Diagramm 19 ist nun zu sehen, dass die mittlere Flussdichte höher wird, je kleiner das Target wird. Dies ist damit zu begründen, dass bei kleineren Targets die Lampenzielpunkte enger auf dem Target zusammenliegen.

Wesentliches Kriterium für die Güte der Flussdichteverteilungen ist die Homogenität. Diese wird dargestellt durch die Differenz des Maximalwertes und des Randwertes. Definiert wird der Maximalwert als Mittelwert von 121 Bins, wobei der mittlere Bin genau in der Mitte des Targets liegt. Der Randwert entspricht ebenfalls dem Mittelwert einer Fläche von 11 mal 11 Bins; diese sind mit dem Außenrand am Rand Targets positioniert.

Am Beispiel der Targets R250 wird gezeigt, wie sich die Mittelwerte der Mitte und des Randes der mittleren Flussdichte annähern (Diagramm 20 und 21).

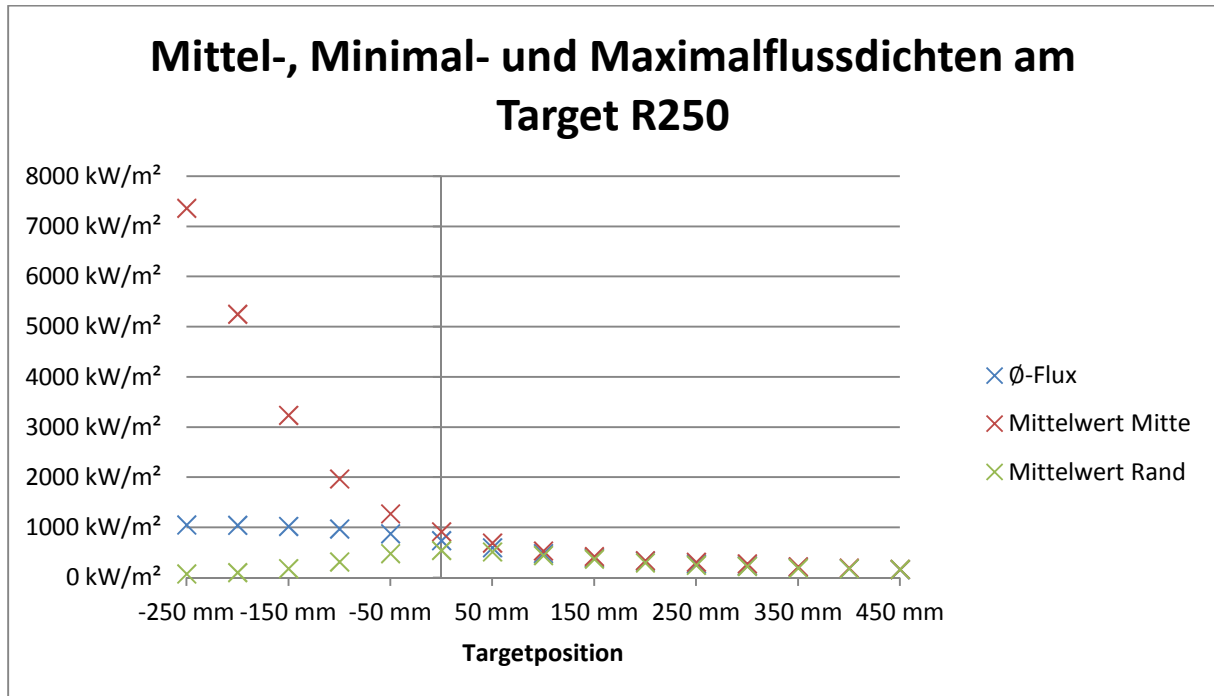


Diagramm 20 - Mittel-, Minimal- und Maximalflussdichten am Target R250

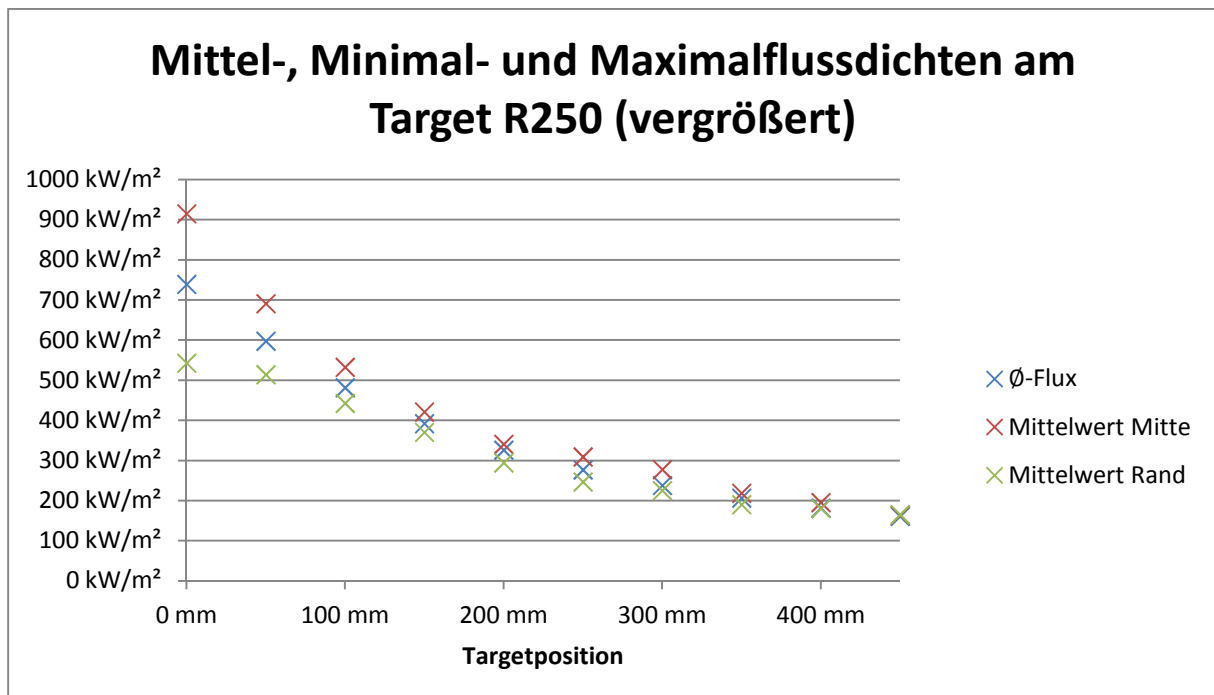


Diagramm 21 - Mittel-, Minimal- und Maximalflussdichten am Target R250 (vergrößert)

Am Beispiel des R250 wird in Diagramm 20 und noch einmal vergrößert in Diagramm 21 gezeigt, dass durch Verfahren des Targets nach vorne die maximale Flussdichte sehr schnell abfällt. Dabei werden zeitgleich die Differenzen zwischen der mittleren Flussdichte und den Extremwerten kleiner.

Eine Abflachung der Flussdichteverteilung geht zu Lasten der maximalen Flussdichte.

Um auf einen Blick sehen zu können, wieviel Differenz toleriert werden muss, um eine vorher festgelegte Flussdichte zu erreichen, wurde ein Diagramm erstellt, bei dem die prozentuale Abweichung zwischen der Flussdichte in der Mitte und der Flussdichte am Rand gegen die mittlere Flussdichte aufgetragen wurde (Diagramm 22).

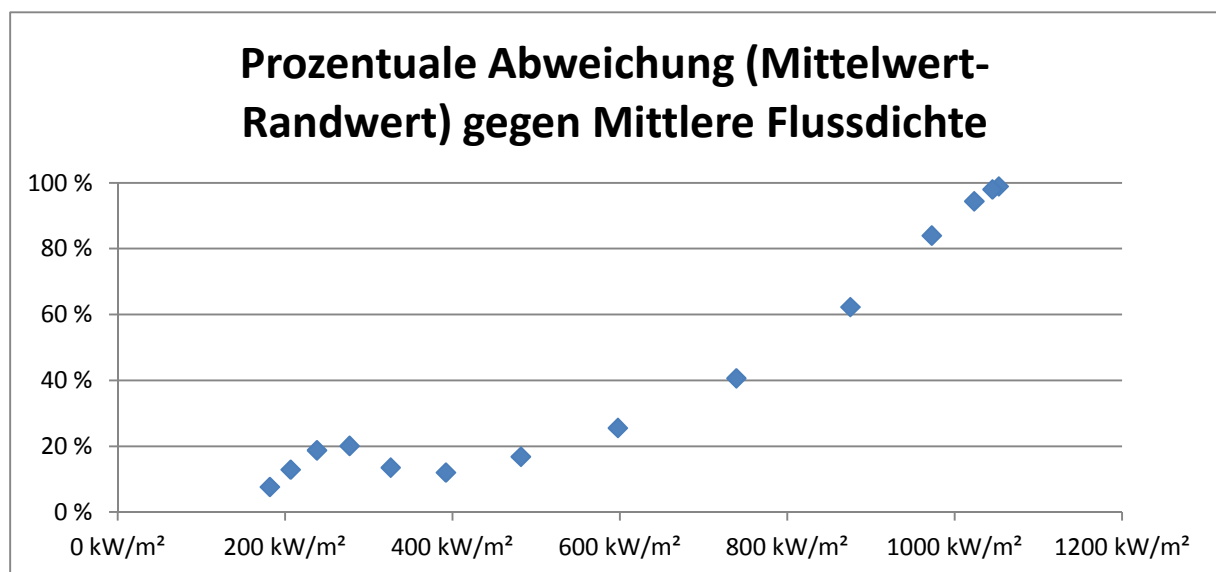


Diagramm 22 - Prozentuale Abweichung (Mittelwert-Randwert) gegen Mittlere Flussdichte (R250)

Aus den Diagrammen Diagramm 17, Diagramm 19 und Diagramm 22 lassen sich folgende Betriebskennwerte beispielhaft herauslesen.

Tabelle 2 - Betriebskennwerte für Target R250 an Position +150mm

Diagramm 22	
Prozentuale Abweichung (Mittelwert-Randwert)	12%
Mittlere Flussdichte	391,9 kW/m²
Diagramm 19	
Mittlere Flussdichte	391,9 kW/m²
Targetposition	+150 mm
Diagramm 17	
Targetposition	+150 mm
Leistung auf dem Target	76,96 kW

Unter einer gewissen Grenze werden die Kurven für die Abweichung aufgetragen über dem Mittelwert unstetig. Diese Ungenauigkeiten in Form von lokalen Peaks sind der Endlichkeit der Strahlen sowie der Bins geschuldet. Eine andere Möglichkeit ist, dass die Streuung der Strahlen auf der verkürzten Wegstrecke kleiner wird. Dadurch kann eine Lampe einen lokalen Peak erzeugen. Fällt ein solcher Peak in den Randbereich des Targets, wird die Abweichung zwischen Mittel- und Randwert verfälscht.

Bestimmung der Kennlinie für quadratische Targets

Bei den quadratischen Targets wird analog zu den runden Targets vorgegangen. Die Benennung der Targets entspricht der Kantenlänge in Millimetern. Simuliert wurden die Targets 500x500, 750x750, 1000x1000 und 1500x1500.

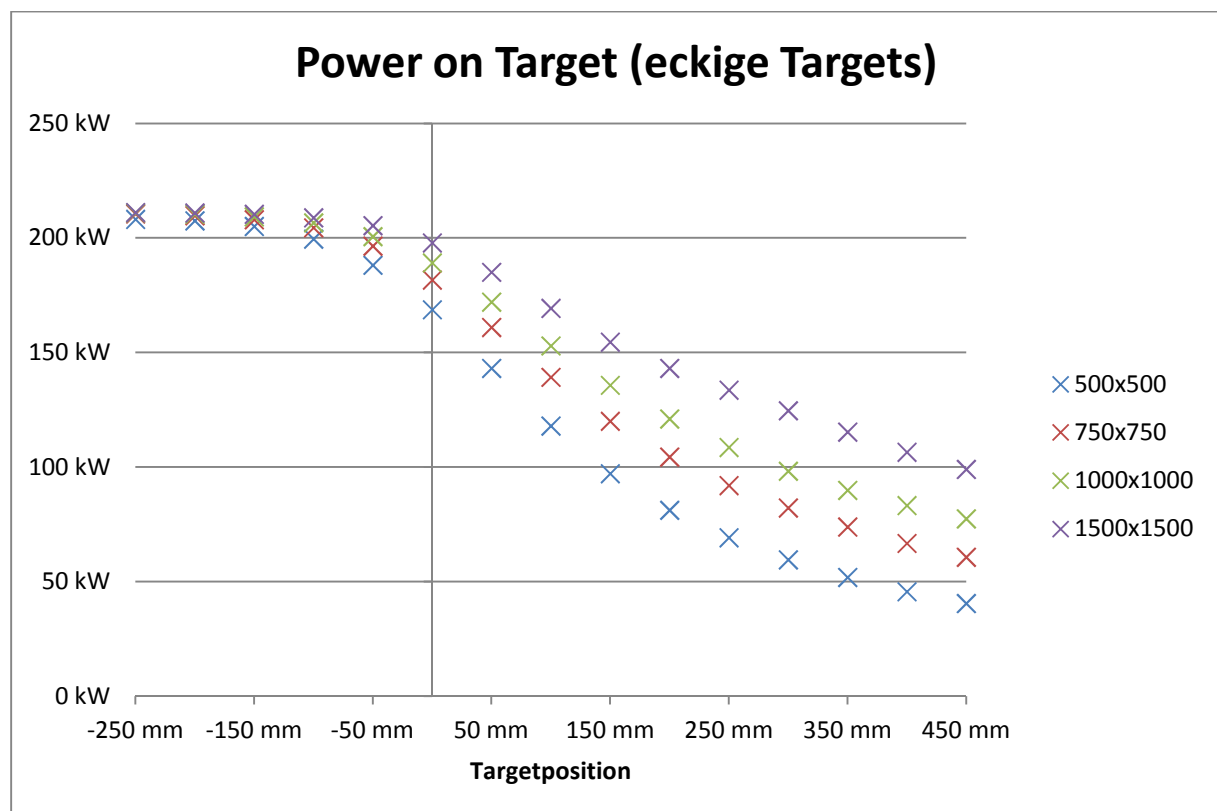


Diagramm 23 - Power on Target (eckige Targets)

Die Verläufe der Kurven in Diagramm 23 ähneln denen der runden Targets mit Ausnahme des Target R125 aus Diagramm 17. Alle Kurven sättigen im negativen Bereich gegen eine Leistung von 211 kW und fallen asymptotisch gegen verschiedene Werte im positiven Bereich.

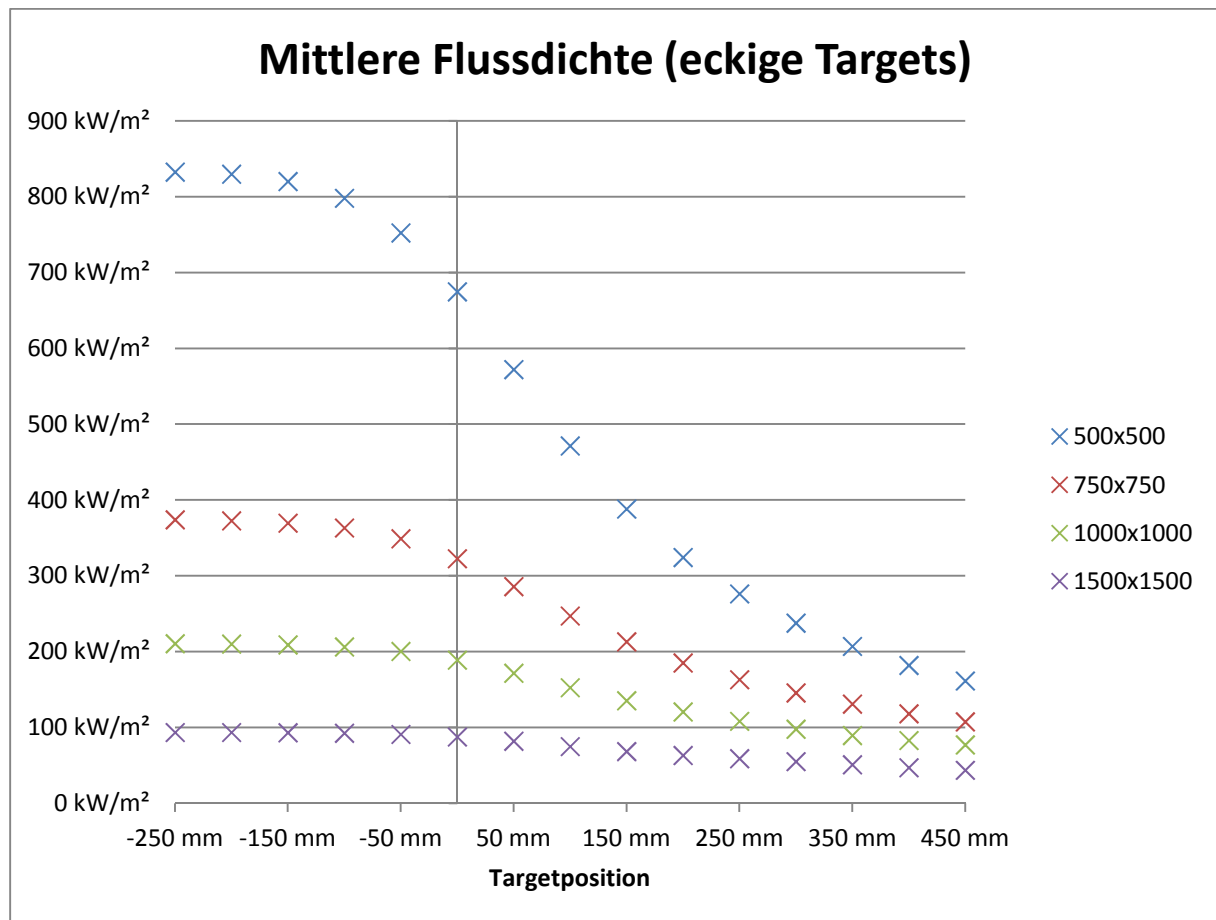


Diagramm 24 - Mittlere Flussdichten (eckige Targets)

Auch die Verläufe der mittleren Flussdichten in Diagramm 24 ähneln denen in Diagramm 18. Unterschiedlich ist die maximale, simulierte Flussdichte von 830 kW/m² gegenüber 3370 kW/m². Dies ist darin zu begründen, dass das kleinste runde Target um den Faktor 5 kleiner ist als das kleinste quadratische. Daher ist die Strahlung auf einer größeren Fläche verteilt und die Flussdichte sinkt.

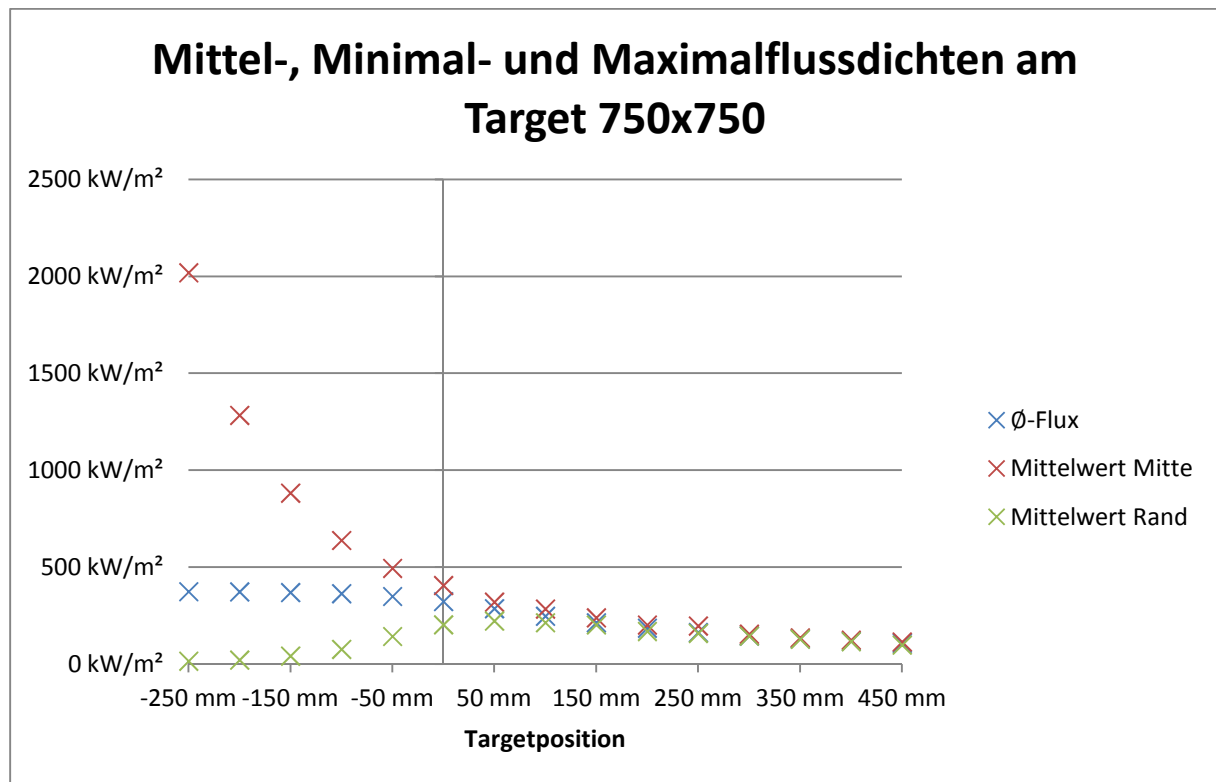


Diagramm 25 - Mittel-, Minimal- und Maximalflussdichten am Target 750x750

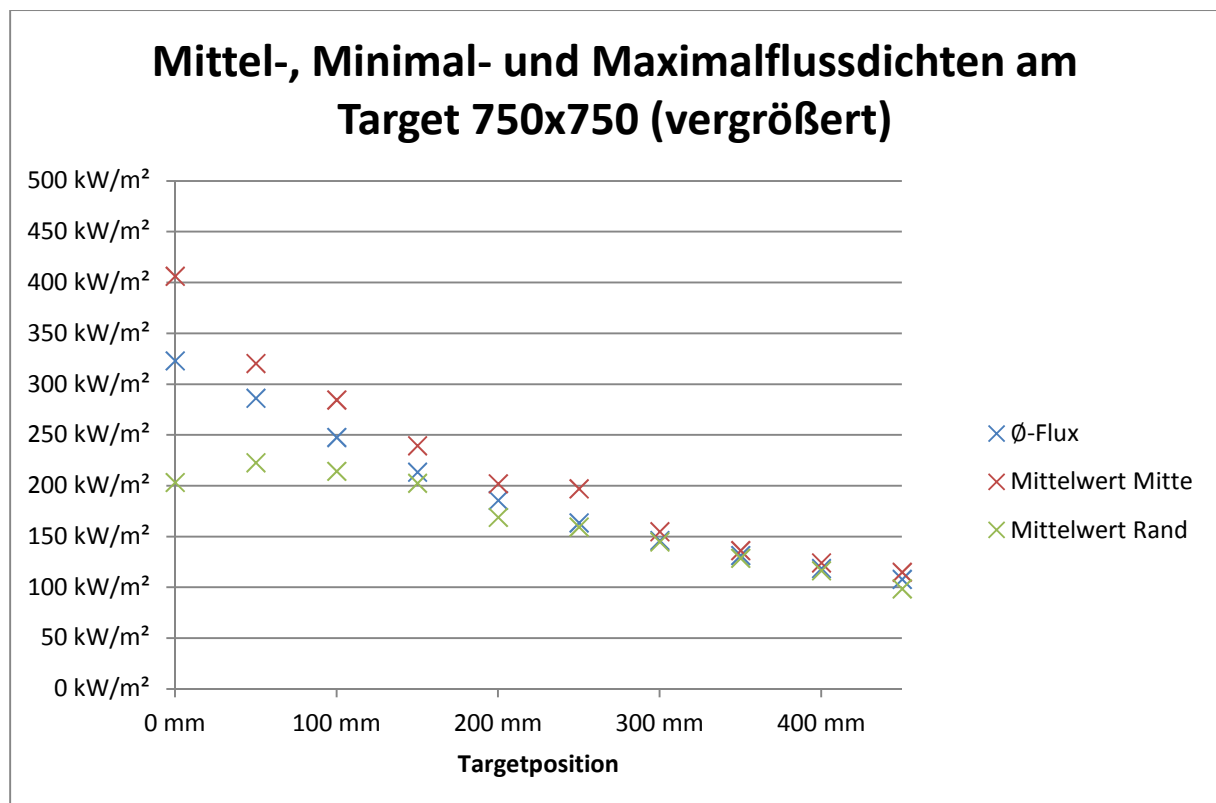


Diagramm 26 - Mittel-, Minimal- und Maximalflussdichten am Target 750x750 (vergrößert)

Die Abweichung der Extremwerte vom Mittelwert wird auch in diesem Fall (Diagramm 25 und Diagramm 26) mit der Verschiebung des Targets nach vorne in Richtung Strahler immer kleiner. Ein Ausreißer ist der Maximalwert für die Position +250mm.

Analog zu den Diagramm 22 für die runden Targets wird auch in Diagramm 27 die prozentuale Abweichung des Randwertes vom Mittelwert über der mittleren Flussdichte aufgetragen.

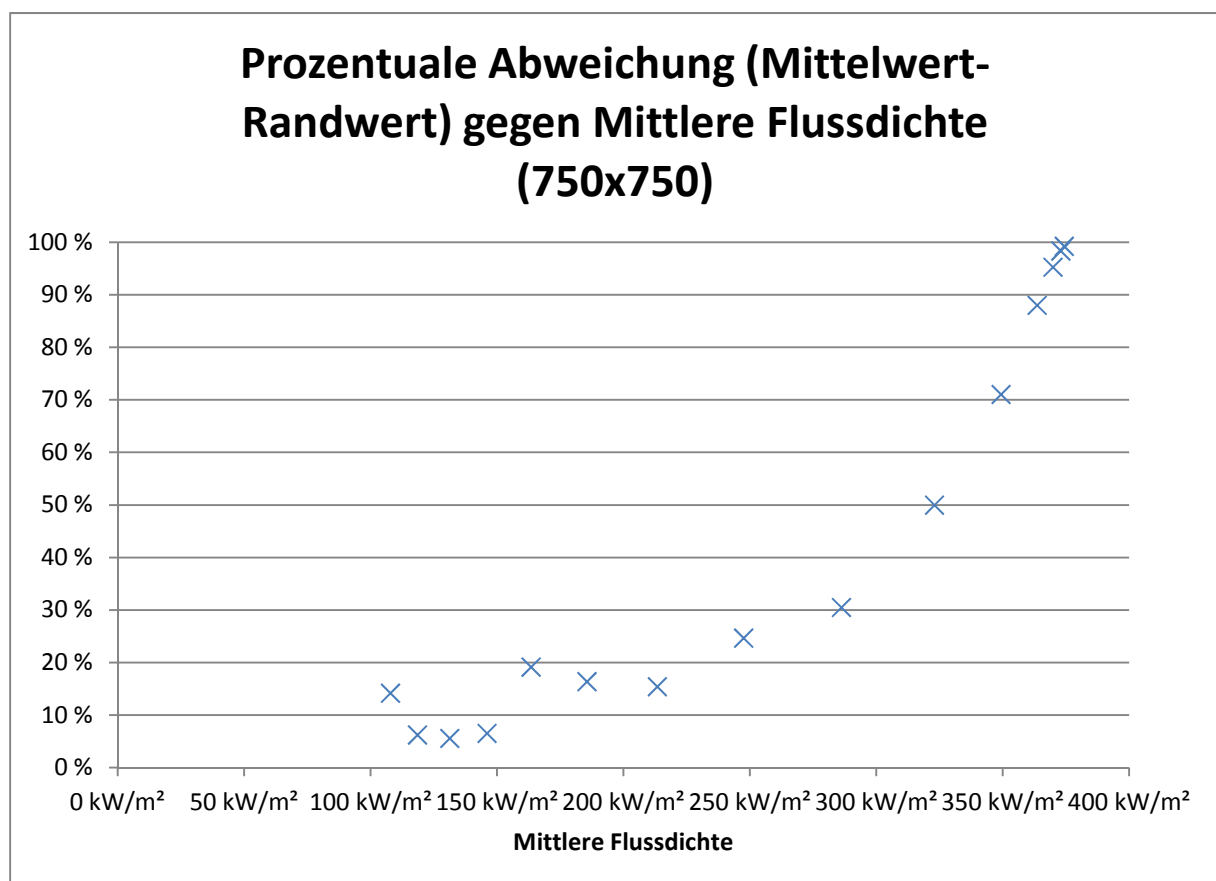


Diagramm 27 - Prozentuale Abweichung (Mittelwert-Randwert) gegen Mittlere Flussdichte (750x750)

In Diagramm 27 lässt sich die Abweichung ablesen, welche für die gewünschte Flussdichte toleriert werden muss. Auch in diesem Diagramm verläuft die Kurve für mittlere Flussdichten unterhalb von 220 kW/m² unstetig.

Beispielhaft lassen sich für das Target 750x750 folgen Kennwerte ablesen.

Betriebskennwerte	
Prozentuale Abweichung (Mitte-Rand)	24,7%
Mittlere Flussdichte	247,5 kW/m²
Targetposition	+100 mm
Leistung auf dem Target	139 kW

7.3.2.Simulation des Pilotprojektes

Im Projektantrag zur Förderung des mHLS ist ein Pilotprojekt enthalten. Das Arbeitspaket 7 des Antrags beinhaltet den Aufbau eines Receivers zur thermochemischen Wasserstofferzeugung sowie die erforderlichen Komponenten, um diesen zu betreiben. Der Receiver soll 12 Monate lang für Inbetriebnahme und Experimente im mHLS verbleiben. Zusätzlich soll er Möglichkeiten zur Verwendung des mHLS aufzeigen.

Dieser Receiver hat ein rundes Strahlungseintrittsfenster mit 550mm Durchmesser. Ziel war es, diese Fläche homogen auszuleuchten und dabei die auftreffende Leistung zu maximieren.

Da das Fenstermaß am nächsten an das des R250 herankommt, wurde diese Grundeinstellung verwendet.

Begonnen wurde die Simulation im Rahmen der vorliegenden Masterarbeit bei der Targetposition 0mm. Bewegt wird es ausschließlich in positiver z-Richtung, da die Flussdichte in diese Richtung homogener wird. Ein weiteres Fokussieren durch Verstellung des Targets in negative Richtung war aufgrund des Ziels, eine homogene Flussdichtedistribution zu erhalten, nicht notwendig.

Da der Receiver für die Verwendung in Solartürmen konzipiert wurde, die noch eine weit höhere Flussdichte und Gesamtleistung aufweisen, mussten keine Restriktionen bezüglich der maximalen Flussdichte beachtet werden.

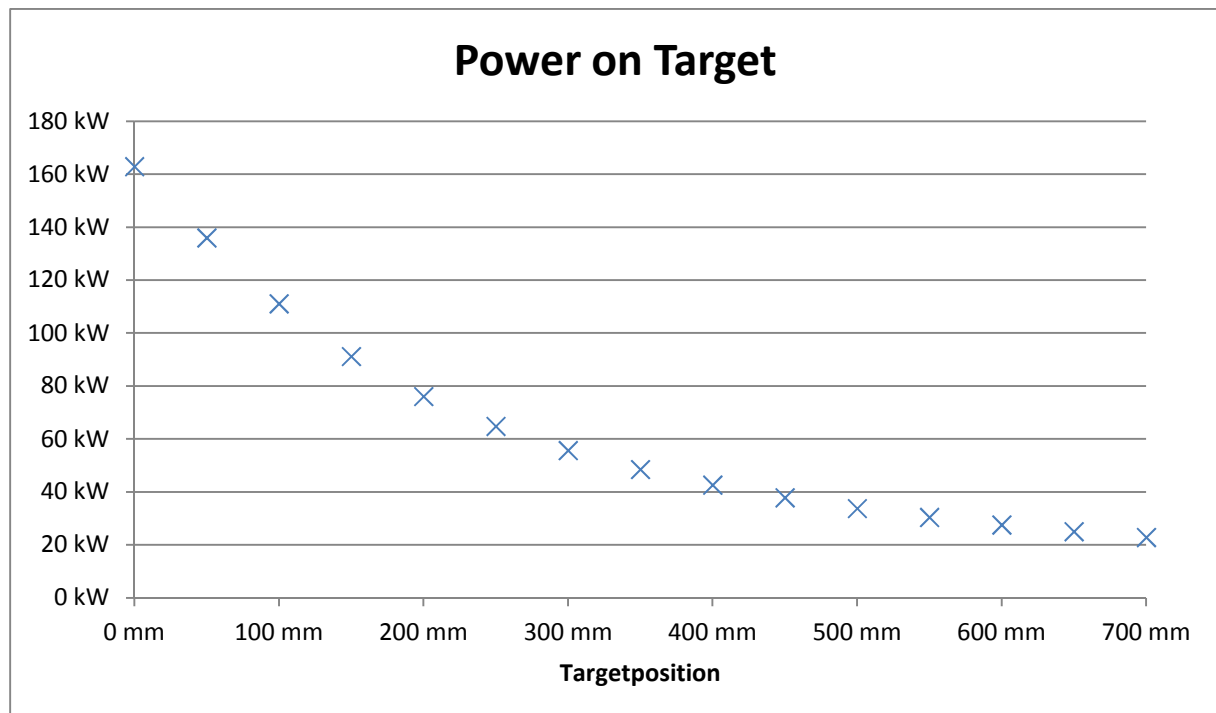


Diagramm 28 - Power on Target (Wasserstoffreaktor)

Wie in Diagramm 28 zu sehen ist, rangiert die Leistung, die auf den Reaktor fällt, je nach Position des Reaktors zwischen 162,8 kW und fällt ab bis zu 22,8 kW. Durch langsames Verfahren von vorne nach hinten ist eine Regulierung der Strahlung möglich, was zum einen ein langsames Aufheizen des Receivers ermöglicht, zum anderen das schrittweise Abkühlen. Dies ist wichtig, um thermische Shocks vorzubeugen und den Reaktor nicht zu beschädigen.

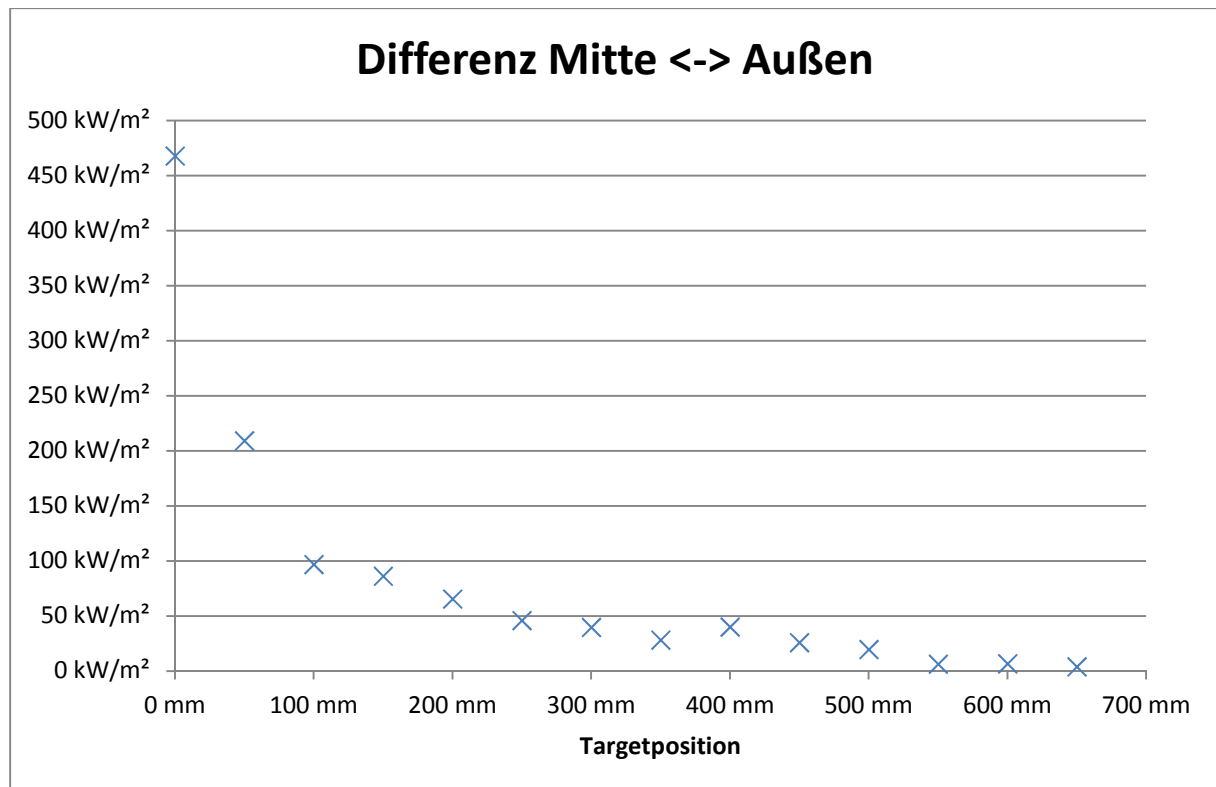


Diagramm 29 - Differenz Flussdichte Mitte <-> Außen

Die Differenz zwischen Mitte und Rand (Diagramm 29), welches als Maß für die Homogenität der Flussdichteverteilung herangezogen wird, hat in der Simulation ein lokales Minimum bei der +350mm Position. Die Differenz an dieser Position beträgt 28 kW/m².

Die prozentuale Abweichung der Flussdichte vom Mittelwert ist in Diagramm 30 aufgetragen. In

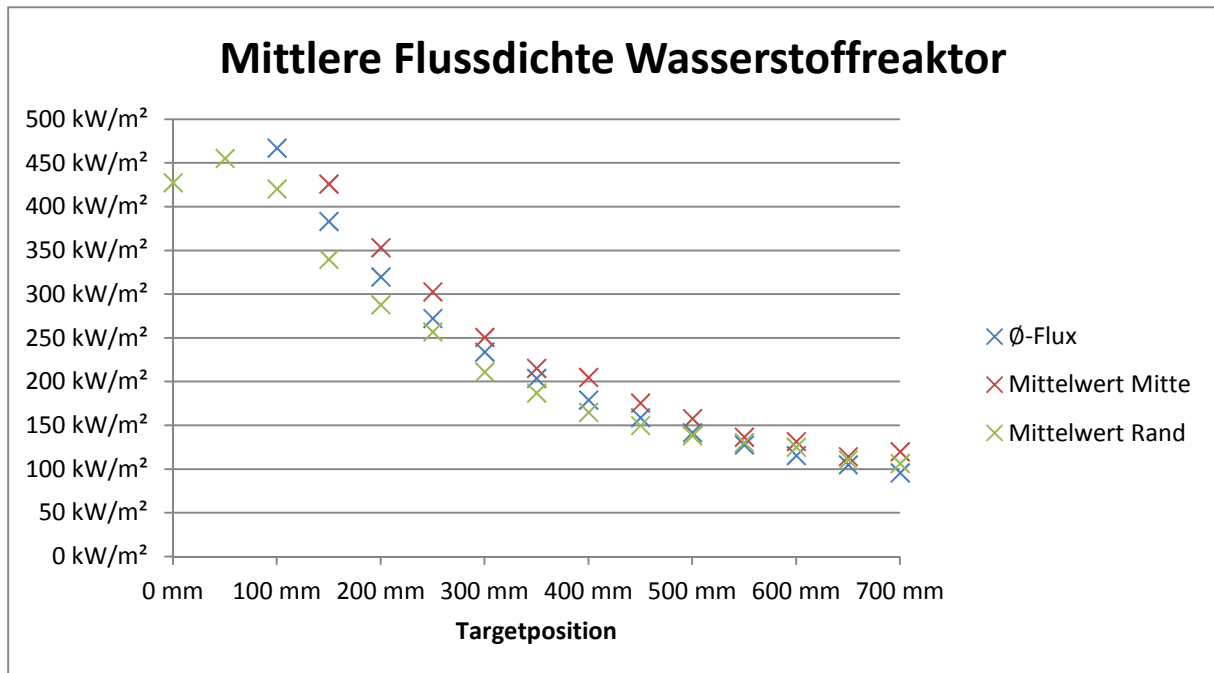
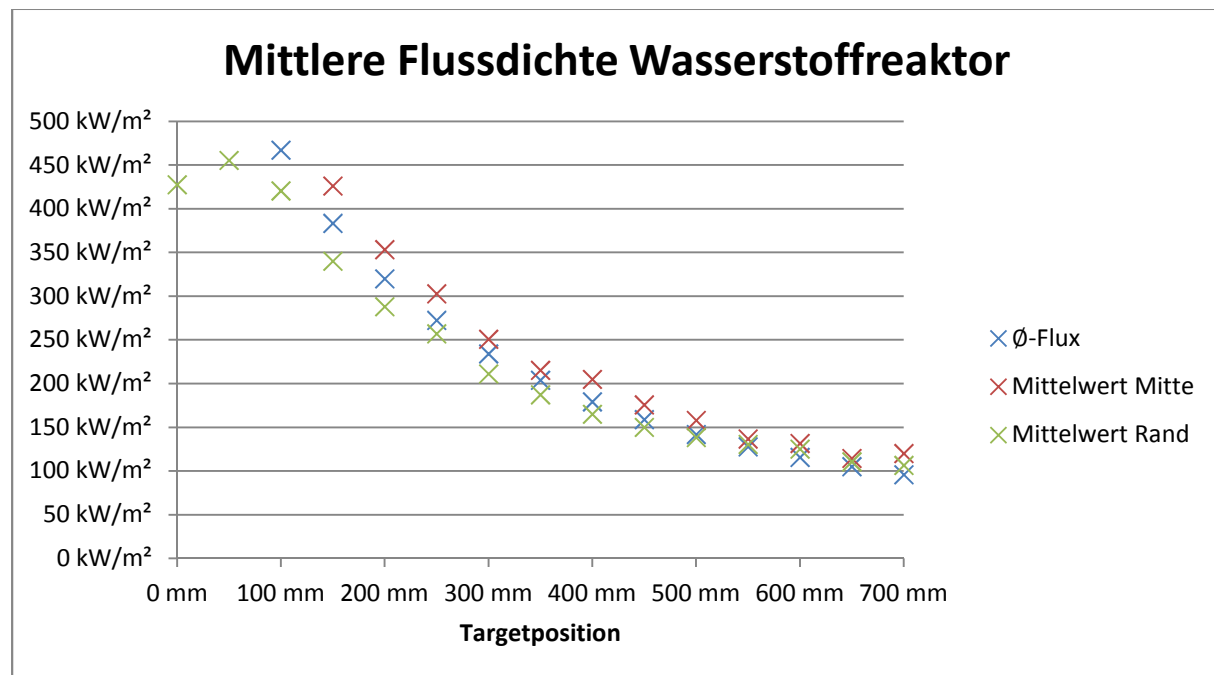


Diagramm 31 sieht man die mittlere Flussdichte, sowie die Mittelwerte am Rand und in der Mitte in absoluten Zahlen.



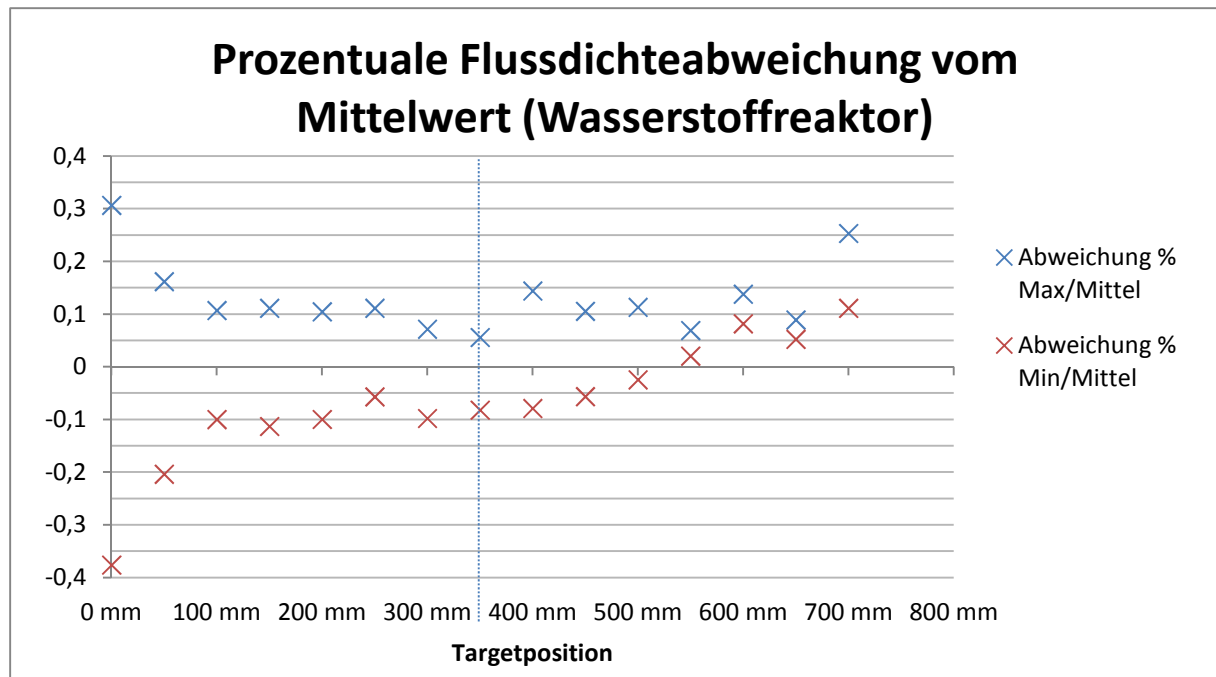


Diagramm 30 - Prozentuale Flussdichteabweichung vom Mittelwert (Wasserstoffreaktor)

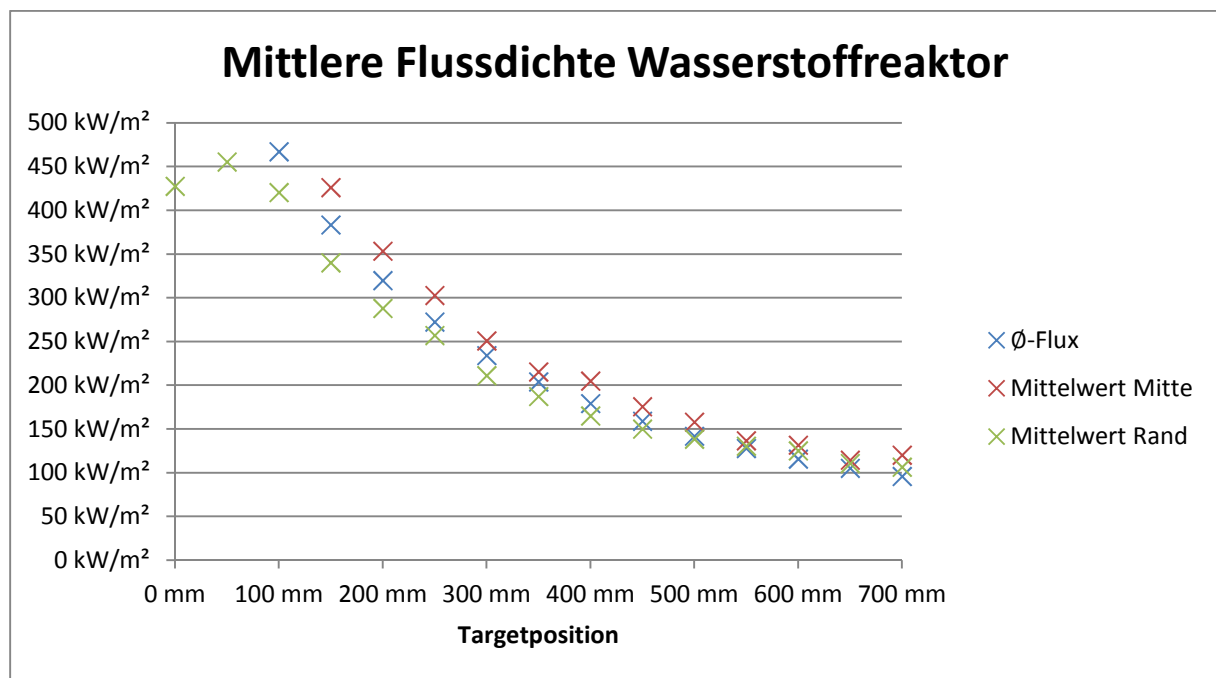


Diagramm 31 - Mittlere Flussdichte Wasserstoffreaktor

Folgende Betriebskennwerte lassen sich aus den Diagrammen herauslesen.

Tabelle 3 - Betriebskennwerte Wasserstoffreaktor Position +350 mm

Betriebskennwerte	
Position	350 mm
Prozentuale Abweichung	-8,2% ; +5,6%
Mittlere Flussdichte	215,2 kW/m²

Leistung auf dem Target	48,5 kW
-------------------------	---------

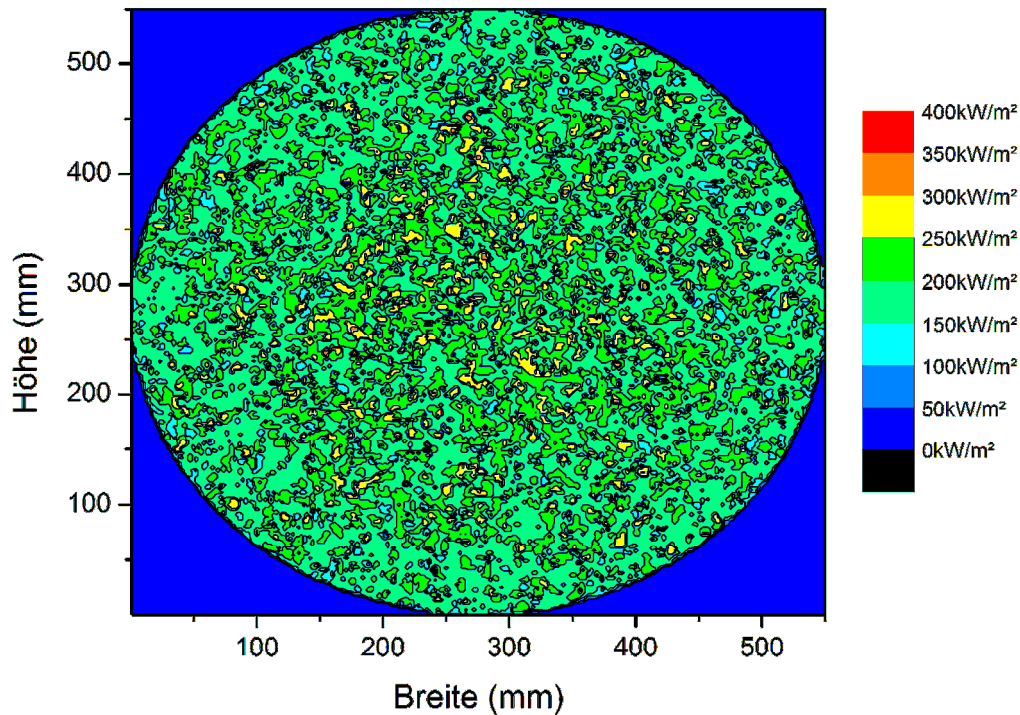


Diagramm 32 - Flussdichteverteilung Wasserstoffreaktor Position +350mm

Diagramm 32 bestätigt die Annahme, dass die Flussdichteverteilung bei der Position +350mm nahezu homogen ist.

Sollte für die Durchführung des Experimentes die eingestrahlte Leistung und Flussdichte ausreichen, wird diese Einstellung empfohlen. Ist dies nicht der Fall, muss das Target weiter nach hinten verschoben werden, wodurch die Leistung erhöht wird, aber eine größere Inhomogenität in Kauf genommen werden muss.

7.4. Interpretation der Simulationsergebnisse

Die Simulationen im Rahmen der vorliegenden Arbeit haben ergeben, dass es möglich ist, die Flussdichteverteilung bei einer Xenonblock-Grundeinstellung pro Targetgröße durch Verändern der

Targetposition zu formen. Eine Bewegung nach vorne bewirkt hierbei eine Abflachung des Flussdichteprofiles. Die maximal erreichbare Peakflussdichte liegt dabei bei $8,5 \text{ MW/m}^2$.

Die Wahl der Targetposition bei den Flussdichteverteilungen ist ein Optimierungsproblem, das für jedes Experiment neu gelöst werden muss. In Konkurrenz stehen die Leistung auf dem Target und die Homogenität der Strahlung. Je höher die gewünschte Leistung ist, desto größer ist die Differenz zwischen der maximalen Flussdichte in der Mitte des Targets und der niedrigsten Flussdichte am Rand des Targets.

Die genaue Positionierung muss mit dem Experimentator abgesprochen werden. Die Kennlinien, um die Flussdichteverteilungen und die Homogenität zu bestimmen, wurden im vorangegangenen Kapitel erstellt.

Simuliert wurden hierbei mögliche Betriebsfälle, wobei nicht ausgeschlossen ist, dass weitere Anfragen hinzukommen. In diesen Einzelfällen muss dann in der Simulation bzw. am im Betrieb befindlichen Strahler eine neue Positionierung und damit Flussdichteverteilung gefunden werden. Diese ist Zeit- und damit auch Kosten-aufwendig. Ein breites Portfolio wurde aber mittels Simulation erstellt.

Zu erkennen ist, dass die Flussdichteverteilung inhomogen wird, wenn das Target zu weit in positiver z-Richtung verfahren wird. Das liegt daran, dass die einzelnen Lichtflecke nicht mehr so stark verschmieren, sondern einzeln erkennbar sind.

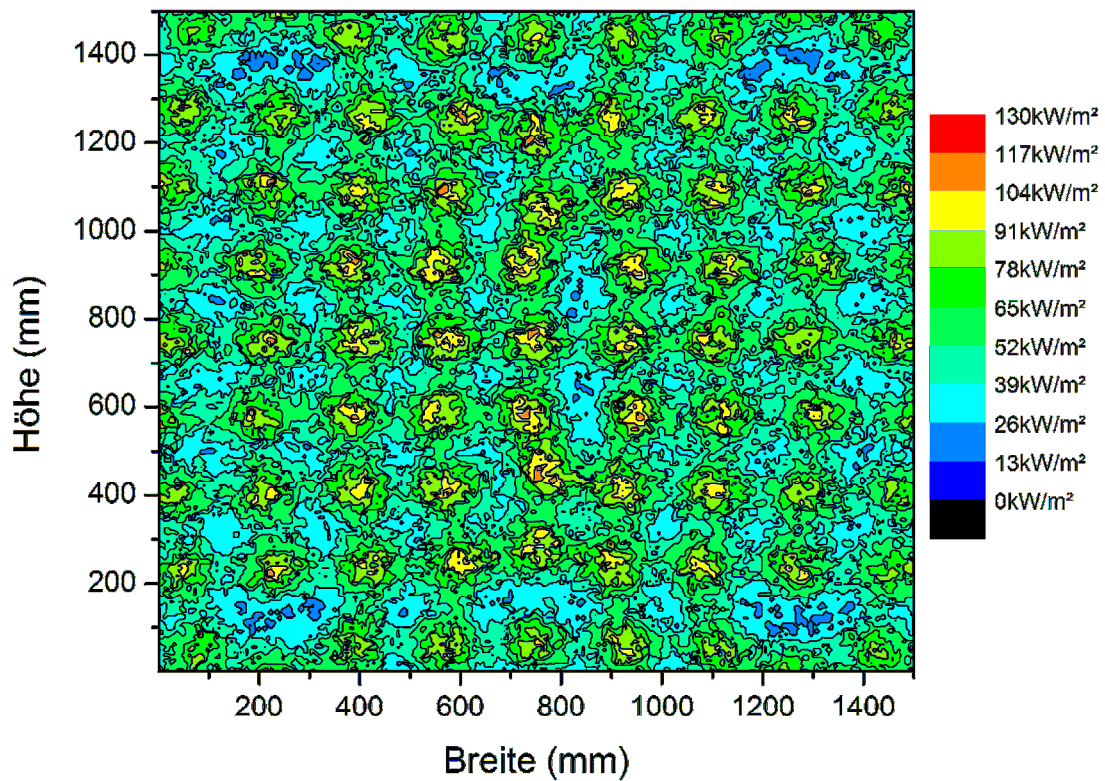


Diagramm 33 - Flussdichteverteilung 1500x1500 Position +300mm

In Diagramm 33 erkennt man das Auftrennen der einzelnen Lampenzielpunkte auf dem Target. Eine weitere Verschiebung nach vorne lässt die einzelnen Lampenzielpunkte noch klarer werden, die Verschiebung nach hinten, wie in Diagramm 34, lässt die Zielpunkte wieder ineinander verschwimmen.

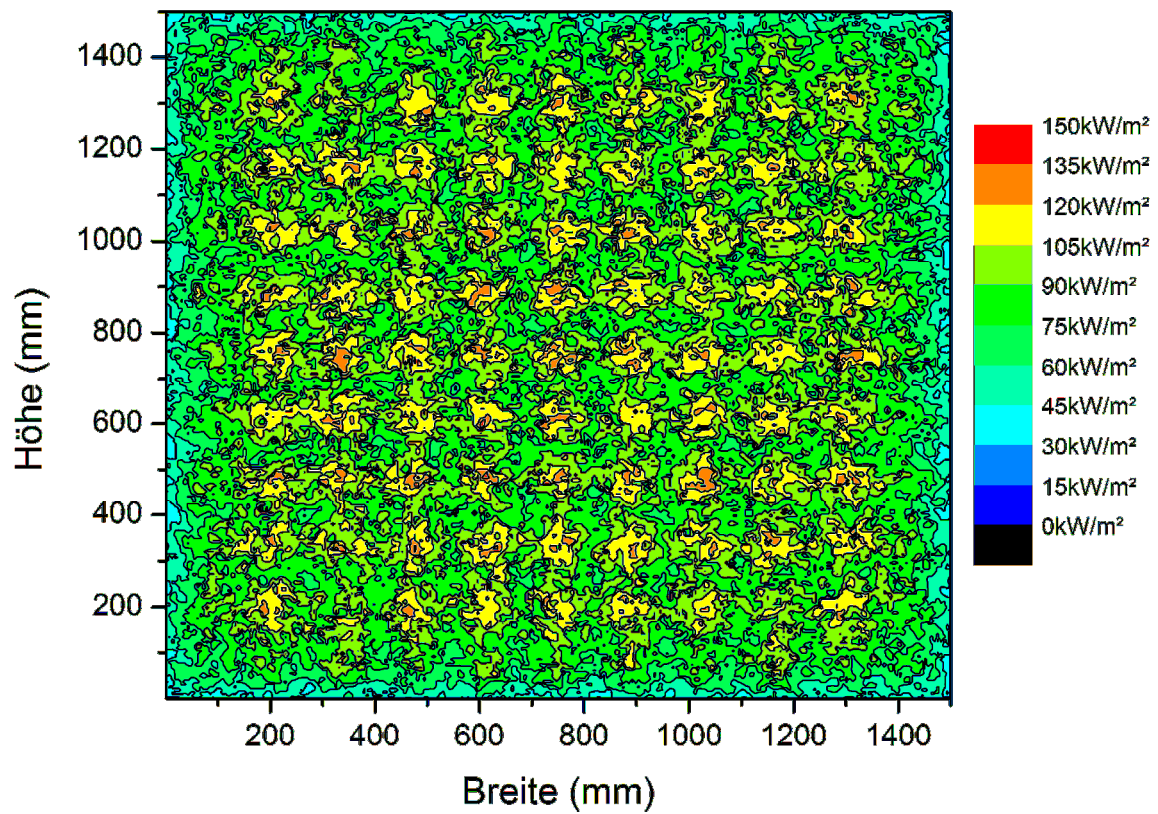


Diagramm 34 - Flussdichteverteilung 1500x1500 Position 0

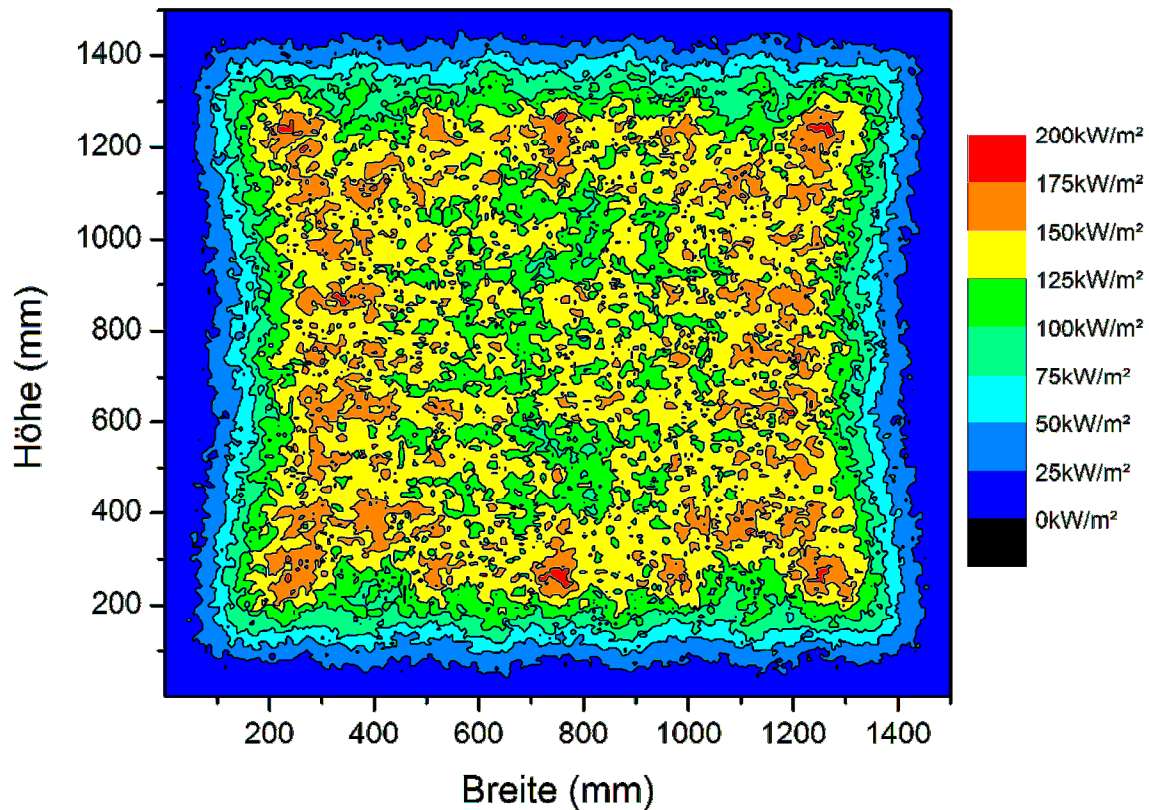


Diagramm 35 - Flussdichteverteilung 1500x1500 -150mm

Diagramm 35 zeigt die Flussdichteverteilung des Targets 1500x1500 in der Position -150mm. Die einzelnen Lampenzielpunkte sind nicht mehr voneinander zu unterscheiden.

Zu jeder Targetposition muss die Flussdichteverteilung geeignet bildhaft abgelegt sein. Die Werte zwischen Minimum und Maximum haben nur dann eine hohe Aussagekraft über die Homogenität der Verteilung, wenn die Verteilung einer Gaußverteilung gleicht

Diagramm 33 zeigt eindeutig, dass das Entnehmen der Flussdichtewerte sowie der Differenz zwischen Maximalwert in der Mitte und Minimalwert am Rand nicht ausreicht, um die Flussdichte eindeutig zu beschreiben.

Außerdem zeigt diese Grafik den Grund für die Sprünge in Diagramm 22 und Diagramm 27. Da die Flussdichteverteilungen nicht mehr einer dreidimensionalen Gaußglocke gleichen, stimmen die Werte für das Maximum sowie das Minimum der Flussdichteverteilung nicht mehr.

Liegt ein Peak genau in dem Bereich am Rand, der für die Bestimmung des Mittelwertes verwendet wird, nimmt die Differenz zwischen Minimum und Maximum ab.

8. Einfluss der optischen Eigenschaften auf die Flussdichte

Die Oberflächenrauigkeit hat einen enormen Einfluss auf die Flussdichteverteilung der einzelnen Xenonblöcke und damit auch auf die Gesamtflussdichteverteilung. Um den Einfluss darzustellen, wurden Simulationen für die maximale Flussdichte mit variierenden Werten für das Sigma der Streuung dargestellt.

Zudem wurde der Durchmesser des 10%-Leistungsradius angegeben.

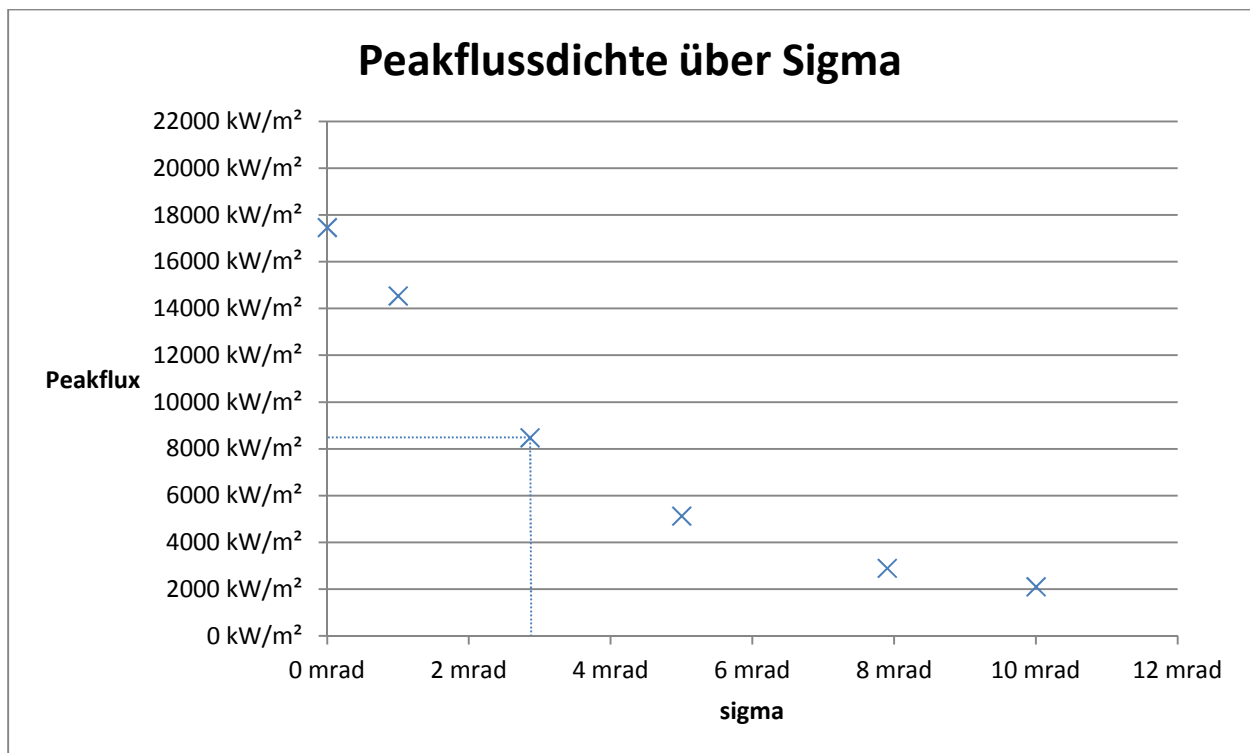


Diagramm 36 - Maximalflussdichte aufgetragen über Sigma

In Diagramm 36 ist die Peakflussdichte (Flussdichte im 10%-Leistungsradius) gegen das Sigma der Strahlaufweitung durch Streuung an der Spiegeloberfläche aufgetragen. Der markierte Wert bei 2,8 mrad entspricht den gemessenen und für die Simulation verwendeten Werten. Zu sehen ist, dass bei optisch perfekten Reflektoren ohne Streuung an der Oberfläche eine Maximalflussdichte von 17,5 MW/m² möglich ist. Dieser Wert ist rein theoretisch, da diese Oberflächenebenheit in der Praxis nicht hergestellt werden kann. Die Peakflussdichte reagiert sehr empfindlich auf Veränderungen der Oberflächenqualität. Daher ist sind die theoretisch simulierten Werte bei der Inbetriebnahme des Strahlers zu überprüfen und ggf. zu verwerfen.

Mit geringerem Sigma nimmt auch die Größe der beleuchteten Fläche ab. In Diagramm 37 ist die Größe des 10% Leistungsradius gegen Sigma aufgetragen.

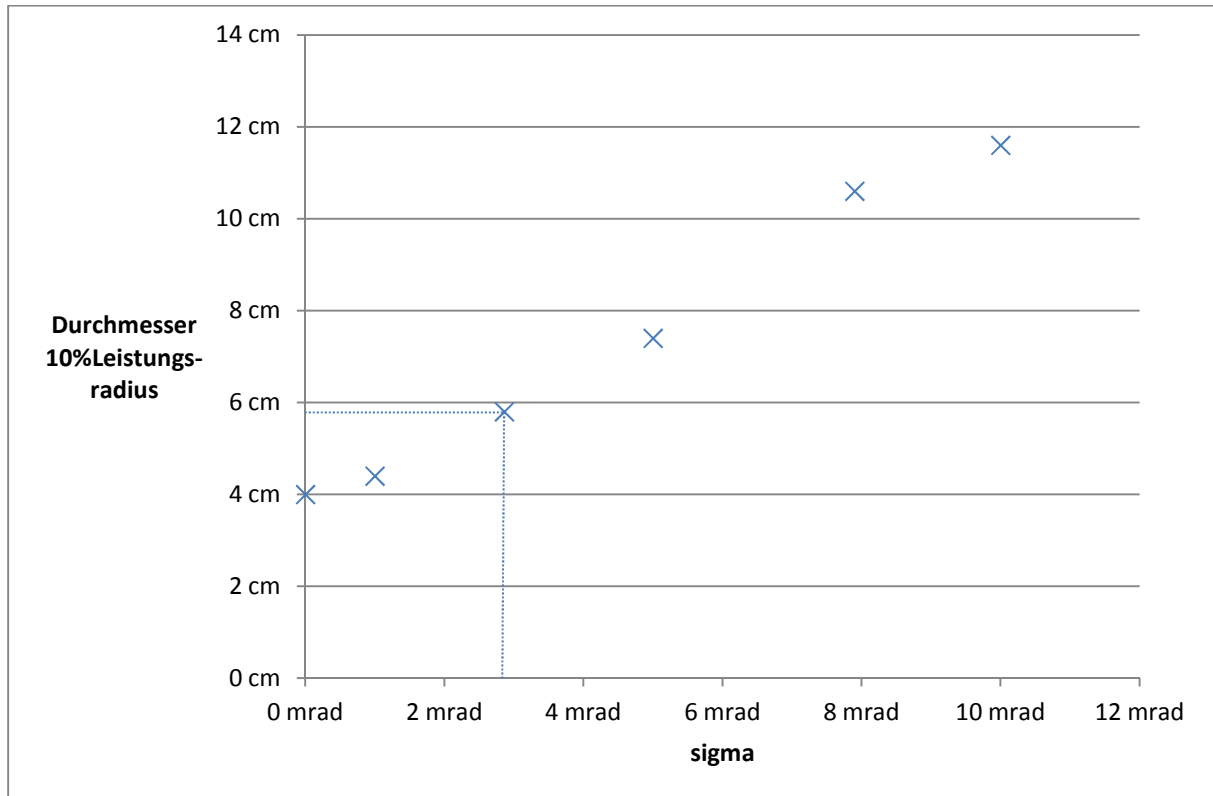


Diagramm 37 - Durchmesser der 10%-Leistungsradien

Der Durchmesser des 10%-Radius des mHLS beträgt bei den simulierten Werten 5,8 cm. Der HLS in Köln verfügt über einen Durchmesser von 2,4 cm und ist damit deutlich kleiner. Auch die Größe der Abbildung reagiert sehr empfindlich auf die Änderung der Oberflächenrauigkeit der Reflektoren. Bei einer nicht-streuenden Spiegelung würde der 10%-Radius einen Durchmesser von 4 cm haben. Der simulierte Durchmesser ist um 45% größer.

9. Fehlerdiskussion

Im Zuge der Simulationen mit OptiCAD müssen verschiedene Fehlerquellen aufgezeigt werden. Zur Durchführung der Simulation wurden Randbedingungen anhand der physikalischen Eigenschaften der Spiegeloberfläche festgelegt.

Die Messung der Spiegeleigenschaften erfolgte an planen Proben, da die Messgeräte nicht in der Lage sind, an gekrümmten Oberflächen zu messen. Es ist möglich, dass sich durch das Aufbringen der Spiegelbeschichtung auf das Aluminiumsubstrat einer gekrümmten Fläche Unterschiede ergeben.

Bei der Simulation des bereits existenten HLS in Köln stimmt die gemessene Peakflussdichte mit der der Simulation überein, jedoch ist die Flussdichteverteilung über das Target in der Simulation etwas breiter, wodurch es möglich ist, dass am fertigen mHLS die Flussdichteverteilung schmäler und damit höher sein könnte.

Das Gesamtsystem reagiert sehr empfindlich auf die Änderung des Sigmas für die Gauß-scatter Funktion. Es wurde der Mittelwert aus insgesamt 6 Proben berechnet. Aufgrund der kleinen Stückzahl ist es möglich, dass die Qualität der Beschichtung zufällig sehr gut ist. Die Kollegen der Plataforma Solar del Almeria, die die Reflexionsmessungen durchführten, sprachen von sehr guten Spiegeln, die die in Solarkraftwerken eingesetzten Spiegel bei weitem übertreffen.

Die Spiegelproben sind extra für die Messung der Reflektivität hergestellt worden und wurden nicht aus einer Serie im laufenden Betrieb entnommen, da es keine Serienproduktion in diesem Bereich gibt. Daher sind Qualitätsunterschiede von einem zum nächsten Badge möglich.

Durch das Anfitzen einer Gauß-Kurve an die Messwerte wird die Realität nicht exakt abgebildet sondern nur angenähert, wodurch Unterschiede zu den Flussdichteverteilungen am realen Strahler entstehen können.

OptiCAD ist ein Raytracing-Programm und keine CAD- oder FEM-Software. Daher ist es nicht in der Lage, dynamische Berechnungen bei sich ändernden Parametern innerhalb einer Simulation darzustellen.

Beim HLS in Köln ist festgestellt worden, dass die Aluminiumreflektoren im laufenden Betrieb eine Temperatur von bis zu 80°C erreichen. Diese Temperaturerhöhung führt zu einer Verformung in Folge der Wärmeausdehnung des Aluminiums. Dieser Effekt kann in OptiCAD nicht berücksichtigt werden, kann aber zu einer Verbreiterung der Abbildung führen, die die maximal erreichbare Flussdichte absenkt. Im Gegenzug führt eine Verbreiterung der einzelnen Abbildung aber zu der Möglichkeit, die Flussdichteverteilungen homogener zu gestalten.

In den Simulationen werden die Reflektoren als perfekt geformte Ellipsenabschnitte behandelt. Durch das Herstellungsverfahren (Metalldrücken) bedingt, kann es zu Riefen in der Reflektoroberfläche kommen, die die Abbildung des einzelnen Strahlers beeinflussen. Durch Polieren sollen diese Riefen weitestgehend egalisiert werden. Formabweichungen sind aber fertigungsbedingt in Kauf zu nehmen. Eine Fertigung der Reflektoren auf hochpräzisen computergesteuerten Fräsen, wie es bei MIRA gemacht wurde, ist aus wirtschaftlichen Gründen für den mHLS nicht denkbar, obwohl dadurch bessere Ergebnisse erzielt werden könnten.

Die Positionierungsgenauigkeit der Xenonblöcke soll 1mrad betragen. Die bisher ausgewählten Komponenten sollen in der Lage sein, diese Genauigkeit zu erreichen. Eine tolerierte Abweichung von 1mrad erzeugt auf dem Target in 8m Entfernung eine Positionierungsungenauigkeit von 8mm. Dadurch wird sich die Flussdichteverteilung verbreitern und die maximale Flussdichte sinken. OptiCAD rechnet gerade im Falle der Peakflussdichte mit einer perfekten Positionierung aller Lampen auf exakt denselben Punkt. Die Abweichung von 8mm macht bei einem Durchmesser des 10% Leistungsradius von 58mm knapp 14% aus.

Eine weitere Fehlerquelle sind die Aufhängungen der Xenonblöcke. Die Linearführungen für die Verstellung der z-Achse werden sich mit zunehmender Länge durchbiegen. Dadurch können sich Ungenauigkeiten von einigen Millimetern ergeben. Zudem ist zu erwarten, dass sich die Luft in der Experimenthalle erwärmt. Dadurch unterliegt auch die bis zu 4m lange Linearführung der Xenonblöcke einer Längenausdehnung, wodurch sich Ungenauigkeiten ergeben können.

10. Fazit und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde ein Hochleistungs-Sonnensimulator bestehend aus 121 Xenonblöcken simuliert. Dazu wurden die optisch relevanten Eigenschaften der Spiegelschichten vermessen um sie in ein Raytracing-Programm einzupflegen. Durchgeführt wurden dann Simulationen zur maximal erreichbaren Flussdichte sowie homogenen Flussdichten auf verschiedenen Targetgrößen. Diese wurden je 4 Größen für runde und quadratische Targets simuliert. Die runden Targets hatten dabei Durchmesser von 250 – 1500mm, quadratische Targets hatten Kantenlängen zwischen 500 und 1500mm.

Die maximale simulierte Flussdichte erreichte einen Wert von 8,5 MW/m². Damit wurde das im Projektantrag für die Förderung des Projekts durch den Bund und das Land NRW vorgesehene Ziel, eine Flussdichte von mehreren MW/m² zu erreichen, ist, erfüllt.

Ein weiteres Ziel des Projektantrag war es, eine Leistung von 200 kW optisch zu erreichen. Die 121 6kW Xenon-Kurzbogenlampen mit einem Wirkungsgrad von 35% erzeugen eine optische Leistung von 254kW. Dabei ist es möglich, bis zu 211 kW auf die vermessenen Targets zu strahlen, womit auch dieser zu erreichenden Schlüsselgröße genüge getan wurde.

Aufgezeigt wurden mehrere Fehlerquellen, die Eigenschaften des Hochleistungsstrahlers insbesondere in Bezug auf maximale Flussdichte und Flussdichteverteilungen verändern können.

Es wurden Kennlinien aufgenommen, die als Katalog dienen können, um einem Experimentator die Leistungsfähigkeit des Strahlers zu zeigen sowie mögliche Flussdichten auf verschiedenen Targetgrößen darzustellen. Es ist auf einen Blick möglich, Leistung Flussdichten und Abweichungen der Flussdichte von der mittleren Flussdichte zu erkennen.

Mit der gleichmäßigen Verteilung der Zielpunkte auf dem Target wurde auf Anhieb eine sehr gute Möglichkeit gefunden, das Flussdichteprofil abzuflachen. Eine Regulierung der Einstrahlungswerte kann durch einfache Positionsänderung des Targets bzw. des Experimentes erfolgen. Dabei ist allerdings darauf zu achten, dass die Flussdichte weiterhin der Form einer sehr flachen Gauß-Glocke ähnelt. Bei zu weitem Verfahren nach vorne entstehen insbesondere bei großen Targets lokale Peaks im Flussdichteprofil, da sich die Streuung der Lampenabbildung nicht mehr stark genug überschneiden. Maximal erreicht wurden durchschnittliche Flussdichten von bis zu $3,37\text{MW/m}^2$ auf einem Target mit 250mm Durchmesser.

Mit der Planung dieses modularen Hochleistungsstrahlers wird eine Lücke zwischen Experimenten im Labormaßstab und der großtechnischen Anwendung geschlossen. Damit ist die Eingangsintention erfüllt.

Um die Auslastung zu erhöhen, wird es drei Experimenträume geben. In Abbildung 1 sieht man, wie ein Viertel der Xenonblöcke auf ein anderes Ziel gerichtet sind, als die verbleibenden. Nach diesem Schema sollte es möglich sein bis zu drei Experimente zeitgleich bestrahlen zu können. So können in einem Experimentraum Vorbereitungen getroffen werden, während in einem anderen bereits bestrahlt wird.

Mit der Größe des mHLS können Experimente bedient werden, die an den bisher existierenden Sonnenöfen und Simulatoren nicht durchgeführt werden konnten, da die Leistung bzw. die Fläche die bestrahlt werden konnten zu klein waren. Einsatzgrenze ist in den hier durchgeführten Simulationen eine Targetgröße von 1500 mal 1500mm, da die Abbildungen der Xenonblöcke nicht mehr ausreichend verschwimmen, um das Target homogen auszuleuchten. Der Regelbereich durch Verstellen des Targets wird dabei sehr klein; die Flussdichteverteilung wird weniger homogen als bei kleineren Targets.

Bei kleineren Targets ist der mögliche Regelbereich größer, wodurch eine weitere Bandbreite an Leistungen und Flussdichten erzeugt werden kann.

Die Einsatzgrenzen für konkrete Experimente bestimmt der Experimentator, da dieser seine Apparatur kennt und weiß, ob Leistung bzw. Flussdichte oder die Homogenität der Flussdichteverteilung erste Priorität hat.

In einem weiteren Ausbauschritt ist geplant, die Anzahl der Lampen auf 149 zu erhöhen. Damit wächst die Leistung des mHLS auf 313 kW an. Ebenfalls kann die Leistung des mHLS noch durch Verwendung anderer Lampen gesteigert werden. In den Lieferprogrammen namhafter Hersteller befinden sich Lampen, die ebenfalls im mHLS verbaut werden können, aber statt 6 kW bis zu 8 kW Leistung besitzen.

Unter der Annahme, dass die Wirkungsgrade der Lampen gleich sind, wäre es damit möglich, die Flussdichte von maximal 8,48 MW/m² auf 9,9 MW/m² (7 kW Lampen) oder 11,3 MW/m² (8 kW Lampen) zu erreichen. Eine Flussdichte von mindestens 10 MW/m² soll erreicht werden, um Hochtemperaturanwendungen für die Werkstoffforschung bedienen zu können. Dabei sollen Temperaturen von über 2000°C erreicht werden.

Eine weitere Stellgröße zur Erhöhung der Leistung des Strahlers ist die Qualität der Spiegeloberfläche. Wird die Spiegeloberfläche verbessert, um noch weniger zu streuen, erhöht sich ebenfalls die Maximalflussdichte. Im Gegenzug wird das Herstellen von homogenen Flussdichteverteilungen schwieriger, da die Abbildungen auf dem Target kleiner werden.

Bei Inbetriebnahme des Strahlers müssen die in dieser Arbeit ermittelten Daten validiert werden, da die aufgezeigten Fehlerquellen eine schwer abzuschätzende Abweichung zum Simulationsmodell aufweisen können. Nach den realen Messwerten muss ein neuer Flussdichtekatalog erstellt werden, der dazu dient, die möglichen Flussdichteverteilungen und Targetgrößen aufzuzeigen und einem Kunden anzubieten.

Im weiteren Verlauf der Entwicklung des Strahlers müssen mit numerischen Systemen bessere Flussdichteverteilungen und damit verbundene Lampenzielpunkte berechnet werden. Durch das händische Verstellen der Xenonblöcke dauert die Lampenpositionierung bis zu zwei Tage, gefolgt von einer Simulationszeit von bis zu einem Tag. Daher ist die Auswahl an Targetgrößen so gering.

Es wurde davon ausgegangen, dass die Lampenverteilung auf dem Target symmetrisch erfolgen muss, um möglichst flache Flussdichteprofile zu erreichen.

Turmkraftwerke arbeiten mit Onlinealgorithmen, um die Zielpunkte der Heliostatspiegel während des laufenden Betriebs optimal zu verteilen. Ein solches System ist der nächste Schritt zur Entwicklung einer Strahlersteuerung und Automatisierung.

Eine solche Software muss hinterlegt haben, welche Abbildung welche Lampe unter welchem Winkel auf dem Target erzeugt um durch überlagern der 121 bzw. 149 Lampen eine optimale Verteilung zu erreichen.

11. Literatur

- [1] Belhomme, Boris, Pitz-Paal, Robert, Schwarzbözl, Peter, Optimization of Heliostat Aim Point Selection for Central Receiver Systems Based on the Ant Colony Optimization Metaheuristic, Journal of Solar Energy Engineering, Februar 2014
- [2] Dibowski, Gerd, Neumann, Andreas, Rietbrock, Peter, Willsch, Christian, Säck, Jan-Peter, Funken, Karl-Heinz, Der neue Hochleistungsstrahler des DLR - Grundlagen, Technik, Anwendung, Sonnenkolloquium 2007
- [3] T. Huang, G. Yang, and G. Tang, "A fast two-dimensional median filtering algorithm", IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing, vol. 27, no. 1, pp. 13–18, 1979.
- [4] Meyen, Stephanie, Sutter, Florian, Heller, Peter, Near specular scatter analysis method with a new goniophotometer, 2014
- [5] Papula, Lothar : Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler. Band 3: Vektoranalysis, Wahrscheinlichkeitsrechnung, mathematische Statistik, Fehler- und Ausgleichsrechnung. 4. verbesserte Auflage. Vieweg + Teubner, Wiesbaden 2001
- [6] Petrasch, Jörg, Coray, Patrick, Meier, Anton, Brack, Max, Häberling, Peter, Willemin, Daniel, Steinfeld, Aldo, A Novel 50kW 11,000 suns High-Flux Solar Simulator Based on an Array of Xenon Arc Lamps, *J. Sol. Energy Eng* 129(4), 405-411
- [7] Romero, M., Buck, R., Pacheco, J.E., An Update on solar central receiver systems, projects, and technologies, Journal of Solar Energy Engineering, 124(2): S. 98-108, 2002
- [8] Schneider, Jörg, Pehnt, Martin, Effizienzsteigerung in konventionellen Kraftwerken, Springer Verlag, Berlin Heidelberg 2010
- [9] Trieb, F., Schillings, C., Kronshage, S., Klann, U. et al., MED-CSP: Concentrating Solar Power for the Mediterranean Region, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Institut für Technische Thermodynamik, Abteilung Systemanalyse und Technikbewertung, Stuttgart, 2005
- [10] Winter, C.J., Sizmann, R.L., Vant-Hull, L.L., Solar Power Plants, Springer Verlag, Berlin, 1991

12. Verzeichnisse

Abbildung 1 – Erstes CAD-Modell des mHLS in Jülich (Quelle: Architekturbüro Schüssler, Jülich)	3
Abbildung 2 - Benennung der Xenonblöcke	4
Abbildung 3 – CAD-Modell des Xenonblocks im Detail (Quelle: Systemhaus Technik, DLR)	6
Abbildung 4 - Spektrum der Xenon-Kurzbogenlampen (Quelle: Herstellerangabe OSRAM)	7
Abbildung 5 - Prinzipzeichnung von MIRA (Quelle: MIRA Manual für den internen Gebrauch)	9
Abbildung 6 - MIRA Bilder (Links normal - Rechts reingezoomt)	10
Abbildung 7 - Definition des Akzeptanzwinkels (Quelle: MIRA Manual für internen Gebrauch)	10
Abbildung 8 - Reflexionskoeffizient als Funktion des Akzeptanzwinkels	11
Abbildung 9 - Startupteil des Simulationsmacros	14
Abbildung 10 - Xenonblockmodell in OptiCAD	15
Abbildung 11 – Targetdefinition	15
Abbildung 12 - Hauptteil des Macros	16
Abbildung 13 - Macro "mirror"	16
Abbildung 14 - Erste zwei Befehlssätze des Macros "mirror_a"	17
Abbildung 15 - Speichern der Radiometerdatei	17
Abbildung 16 – Radiometerinformationen	19
Abbildung 17 - Zielpunktverteilung auf dem Target: Links Rund Ø=1000mm, Rechts Quadrat 1000mmx1000mm	25
Diagramm 1 - Nach ASTM G173-03 Solar gewichtete Reflektivität (Quelle: Auswertebericht Spiegelvermessung, Florian Wiesinger)	8
Diagramm 2 - Streuung der Spiegel, normiert	12
Diagramm 3 - Radiometerbild	18
Diagramm 4 - Flussdichte des HLS Köln (simuliert)	21
Diagramm 5 - Flussdichte des HLS Köln (gemessen)	22
Diagramm 6 - Gauß-Fit der gemessenen Flussdichte des HLS	23
Diagramm 7 - Gauß-Fit der simulierten Flussdichteverteilung des HLS	23
Diagramm 8 - Erster Schritt der Zielpunktstrategieentwicklung	25
Diagramm 9 - Flussdichteverteilung bei Verschiebung einzelner Xenonblöcke	26
Diagramm 10 - Flussdichteverteilung Target R500 Position 0mm	27
Diagramm 11 - Flussdichteverteilung Target R500 Position +100mm	28
Diagramm 12 - Flussdichteverteilung Target R500 Position +200mm	28
Diagramm 13 - Flussdichteverteilung Target R500 Position +300mm	29
Diagramm 14 - Maximale Flussdichte 6kW Lampen	30
Diagramm 15 - Lampe G6 (senkrecht)	32
Diagramm 16 - Lampe G1 (schräg)	32
Diagramm 17 - Power on Target (runde Targets)	33
Diagramm 18 - Mittlere Flussdichte (runde Targets)	34
Diagramm 19 - Mittlere Flussdichte (runde Targets, Zoom)	35

Diagramm 20 - Mittel-, Minimal- und Maximalflussdichten am Target R250	36
Diagramm 21 - Mittel-, Minimal- und Maximalflussdichten am Target R250 (vergrößert)	36
Diagramm 22 - Prozentuale Abweichung (Mittelwert-Randwert) gegen Mittlere Flussdichte (R250) ...	37
Diagramm 23 - Power on Target (eckige Targets)	38
Diagramm 24 - Mittlere Flussdichten (eckige Targets)	39
Diagramm 25 - Mittel-, Minimal- und Maximalflussdichten am Target 750x750	40
Diagramm 26 - Mittel-, Minimal- und Maximalflussdichten am Target 750x750 (vergrößert)	40
Diagramm 27 - Prozentuale Abweichung (Mittelwert-Randwert) gegen Mittlere Flussdichte (750x750)	41
Diagramm 28 - Power on Target (Wasserstoffreaktor)	42
Diagramm 29 - Differenz Flussdichte Mitte <-> Außen	43
Diagramm 30 - Prozentuale Flussdichteabweichung vom Mittelwert (Wasserstoffreaktor)	44
Diagramm 31 - Mittlere Flussdichte Wasserstoffreaktor	45
Diagramm 32 - Flussdichteverteilung Wasserstoffreaktor Position +350mm	46
Diagramm 33 - Flussdichteverteilung 1500x1500 Position +300mm	47
Diagramm 34 - Flussdichteverteilung 1500x1500 Position 0	48
Diagramm 35 - Flussdichteverteilung 1500x1500 -150mm	49
Diagramm 36 - Maximalflussdichte aufgetragen über Sigma	50
Diagramm 37 - Durchmesser der 10%-Leistungsradien	51
Tabelle 1 - Gegenüberstellung der Gauß-Fits der gemessenen und simulierten Flussdichteverteilungen	23
Tabelle 2 - Betriebskennwerte für Target R250 an Position +150mm	37
Tabelle 3 - Betriebskennwerte Wasserstoffreaktor Position +350 mm	45

Anhang

Beispielmacro für Target R500 Position 0mm, Fokussiert, maximale Flussdichte

```
clear
echo/on
#set/saveray/on
#set/savespot/on
view/noopengl
view/noopengl/rays
set/fletch/off
set/add_rays/on
set/workbox 0 0 0 100 100 100
set/raylim 100 0.01 1
set/fresnel/off
set/autoretrace/off
set/autoredraw/on
#set/color/val 7 12
set/sphlensvertex/on
set/matcatalog/name=schott.agf
set/proximity 0
set/energy/absolute
set/energy/density
set/units/mm
set/wave .55 .55 .55 .55 .55 .55 .55 .55 .55 .55 .55 .55
set/weight 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
#####
# >      Object definition: film
define/film/oval film 500 500
modify/surface/attributes film 0 1 0 0
place/xyz film 0 0 0
#rotate/local/y film 90
translate/global film 0 0 0
radiometer/attach film 250 250

#macro/name="R500/laser/laser.mac"
macro/name="R500/control/control_lines.mac"
#macro/name="R500/positioning/positioning_R500_1st.mac"
#macro/name="R500/positioning/even/positioning_R500_even.mac"
#macro/name="R500/positioning/Neue Skalierung/positioning_R500.mac"
#macro/name="R500/positioning/Neue Skalierung/positioning_R500_2.mac"
macro/name="R500/light/arc_lines.mac"
macro/name="R500/electrodes/electrodes.mac"
macro/name="R500/mirror/mirror_new.mac"
macro/name="R500/scatterer/scatterer_R500.mac"
macro/name="R500/light/light_test.mac"
#macro/name="R500/ray_test/ray_test.mac"
#macro/name="R500/ray_test/ray_test2.mac"
macro/name="R500/ray_test/short/ray_test_short.mac"
#

##radiometer/fileout/name="R500/spotsdata/positioning.csv" film
#
radiometer/fileout/name="R500/spotsdata_aktuell/Fokus.csv" film
view/radiometer film
#view/film film
```

Beispielmacro für Target 1000x1000 Position 0mm, Fokussiert, maximale Flussdichte

```
clear
echo/on
#set/saveray/on
#set/savespot/on
view/noopengl
view/noopengl/rays
set/fletch/off
set/add_rays/on
set/workbox 0 0 0 100 100 100
set/raylim 100 0.01 1
set/fresnel/off
set/autoretrace/off
set/autoredraw/on
#set/color/val 7 12
set/sphlensvertex/on
set/matcatalog/name=schott.agf
set/proximity 0
set/energy/absolute
set/energy/density
set/units/mm
set/wave .55 .55 .55 .55 .55 .55 .55 .55 .55 .55 .55 .55
set/weight 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
```

```
#####
###
```

```
# >      Object definition: film
define/film/rect film 500 500
modify/surface/attributes film 0 1 0 0
place/xyz film 0 0 0
#rotate/local/y film 90
translate/global film 0 0 0
radiometer/attach film 250 250
```

```
# <
#####
###
```

```
macro/name="1000x1000/control/control_lines_1000x1000.mac"
#macro/name="1000x1000/positioning/positioning_1000x1000.mac"
#macro/name="1000x1000/laser/laser.mac"
macro/name="1000x1000/light/arc_lines.mac"
macro/name="1000x1000/electrodes/electrodes.mac"
macro/name="1000x1000/mirror/mirror_new.mac"
macro/name="1000x1000/scatterer/scatterer.mac"
macro/name="1000x1000/light/light_test.mac"
#macro/name="1000x1000/ray_test/ray_test.mac"
#macro/name="1000x1000/ray_test/ray_test2.mac"
macro/name="1000x1000/ray_test/short/ray_test_short.mac"
```

```
##radiometer/fileout/name="1000x1000/positioning.csv" film
#
view/radiometer film
```

Weitere Macros, sowie die Submacros sind auf der CD abgelegt, da diese die Seitenzahlen enorm erhöhen würden.